
BACHELORARBEIT

Herr
Johannes Näther

**Antihafschichten für den
Betonbau**

2012

Fakultät: Maschinenbau

BACHELORARBEIT

Antihafschichten für den Betonbau

Autor:
Herr Johannes Näther

Studiengang:
Maschinenbau - Oberflächentechnik

Seminargruppe:
MB08w3BS

Erstprüfer:
Prof. Dr. rer. nat. Frank Köster

Zweitprüfer:
Diplom-Betriebswirt (VWA) Karsten Just

Einreichung:
Mittweida, 15.09.2012

Faculty of Mechanical Engineering

BACHELOR THESIS

Nonstick surfaces for concrete engineering

author:
Mr. Johannes Näther

course of studies:
Mechanical Engineering

seminar group:
MB08w3BS

first examiner:
Prof. Dr. rer. nat. Frank Köster

second examiner:
Diplom-Betriebswirt (VWA) Karsten Just

submission:
Mittweida, 15.09.12

Bibliografische Angaben

Nachname, Vorname: Näther, Johannes

Thema der Bachelorarbeit: Antihafschichten für den Betonbau

Topic of thesis: Nonstick surfaces for concrete engineering

44 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Maschinenbau, Bachelorarbeit, 2012

Referat

Die vorliegende Bachelorarbeit befasst sich mit der Untersuchung verschiedener Beschichtungen, die der Betonanhaftung an Geräten und Werkzeugen dauerhaft vorbeugen sollen. Anhaftender Beton verursacht hohe Kosten und ist ein erstzunehmendes Problem in der Bauindustrie. Die ersten Kapitel dieser Arbeit beschreiben den Versuchsaufbau und die Haupteigenschaften der untersuchten Schichten. Im folgenden Abschnitt werden die Versuchsergebnisse ausgewertet und analysiert. Im letzten Abschnitt werden alle Ergebnisse der Untersuchung zusammengefasst und einige Ausblicke auf zukünftige Entwicklungs- und Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Abstract

This bachelor thesis is concerned with the investigation of different coatings to prevent the surfaces of tools and parts of building machinery from the adhesions of wet concrete. Adhesions of concrete are a very expensive and serious problem in modern building industries. The first part of this thesis is used to explain the experimental design and the main properties of the investigated coatings. The next section gives the experimental results. Finally all results are recapitulated and some prospects are given.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis _____	VIII
Tabellenverzeichnis _____	VIII
Nomenklatur _____	IX
Einheitenverzeichnis _____	X
Abkürzungsverzeichnis _____	XI
1 Einleitung _____	1
1.1 Problemstellung _____	1
1.2 Moderner Baustoff - Beton _____	4
1.2.1 Allgemeine Zusammensetzung und Unterteilungen _____	4
1.2.2 Bindemittel Zement _____	5
1.2.3 Betonzusatzmittel _____	6
1.3 Wirkung und Anwendung von Trennmitteln _____	7
2 Versuchsaufbau und Vorbereitung _____	9
2.1 Versuchsaufbau _____	9
2.2 Vorbereitung und Fertigung der Proben _____	10
2.3 Vorbereitung der Versuche _____	11
3 Untersuchte Beschichtungen _____	12
3.1 Anforderungen und Auswahl der Beschichtungen _____	12
3.2 Nickel-Phosphorschichten _____	13
3.2.1 Herstellung _____	13
3.2.2 Eigenschaften und Verwendung _____	14
3.2.3 Ni/P - PTFE _____	15
3.2.4 Herstellung der Ni/P-Schicht in der Hochschule Mittweida _____	17
3.3 Hartchromschichten _____	19
3.3.1 Galvanische Herstellung _____	19
3.3.2 Eigenschaften und Verwendung von Chromschichten _____	20
3.3.3 Auftrag der Hartchromschicht _____	20
3.4 Gleitlacke _____	21
3.5 Diamantähnliche Kohlenstoffschichten - DLC _____	22
3.5.1 Herstellung _____	22

Inhaltsverzeichnis	VII
3.5.2 Eigenschaften und Verwendung von Kohlenstoffschichten	23
3.6 Korrosionsschutzwachs	24
3.7 Emailschichten	25
3.8 Kunststoffschichten aus PTFE , PFA und FEP	26
4 Versuchsdurchführung und Ergebnisse	28
4.1 Referenzwertbestimmung	28
4.2 Versuch I - Aushärtungszeit 48 Stunden	30
4.3 Versuch II - Aushärtungszeit 72 Stunden	35
4.4 Versuch III - Betonzusatzmittel: Luftporenbildner	38
5 Kosten-Nutzen Analyse	40
6 Zusammenfassung und Ausblick	43
7 Literatur	45
Glossar	50
Danksagung	52
Anhang	53
Eidesstaatliche Erklärung	XII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 stark verunreinigter Betonkübel nach dem Baustelleneinsatz _____	3
Abbildung 2 Spritzbeton für die Sicherung von Wänden und Decken im Tunnelbau [12] _____	6
Abbildung 3 Reaktion von chemisch reaktiven Trennmitteln [13] _____	7
Abbildung 4 Auftrag von Trennmittel mittels Sprühgerät und Flachdüse [16] _____	8
Abbildung 5 modellhafter Versuchsaufbau beim Trennen _____	9
Abbildung 6 Druckstempel beim Ausdrücken eines Probezylinders _____	9
Abbildung 7 Betonmischung für Versuch I _____	11
Abbildung 8 Prinzip der autokatalytischen Abscheidung von Ni/P-Schichten [20] _____	13
Abbildung 9 Vergleich der Konturtreue von galvanischen und chemischen Nickelschichten [21] _	15
Abbildung 10 Nickelelektrolyt mit zwei Probezylindern _____	18
Abbildung 11 Prinzip der galvanischen Chromabscheidung [26] _____	19
Abbildung 12 Wirkungsweise eines Gleitlacks _____	21
Abbildung 13 Prinzip der plasmaunterstützten chemischen Gasphasenabscheidung [34] _____	22
Abbildung 14 Beschichtung mit Bechem-Korrosionsschutzwachs _____	24
Abbildung 15 Verbundzone zwischen Grundmaterial und Email [39] _____	25
Abbildung 16 Verbesserte Verankerung durch Primer [43] _____	26
Abbildung 17 Referenzkurven von unbehandeltem Stahl _____	30
Abbildung 18 Betonmantel rutscht in der Stahlform _____	31
Abbildung 19 Unvollständiges Kraft-Weg-Diagramm bei der Messung der Hartchromschicht ____	31
Abbildung 20 Wachsrückstände im Betonmantel und entschichteter Probezylinder _____	33
Abbildung 21 Betonkübel mit Skizze [46] _____	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Druckfestigkeitsklassen für Normalbeton nach DIN 1045-1 und DIN1045-2 [6] _____	4
Tabelle 2 Übersicht über wichtige Zementklinkerphasen [8] _____	5
Tabelle 3 Übersicht über alle Versuche _____	10
Tabelle 4 Zusammenfassung der Referenz- und Grenzkkräfte _____	29
Tabelle 5 Versuchsergebnisse von Versuch I _____	32
Tabelle 6 Versuchsergebnisse von Versuch II _____	36
Tabelle 7 Versuchsergebnisse von Versuch III und Vergleichswerte aus den Vorversuchen ____	38

Nomenklatur

Symbol	Einheit	Bedeutung
σ_{Trenn}	N/mm ²	Trennspannung
F_{max}	N	Maximalkraft
A_{Haft}	mm ²	Anhaftungsfläche
d_{Probe}	mm	Probendurchmesser
$h_{\text{Betonmantel}}$	mm	Höhe des Betonmantels
A_{Mantel}	m ²	Mantelfläche des Betonkübels
A_{KM}	m ²	Mantels des Kegelstumpfes
A_{ZM}	m ²	Mantelfläche des Zylinders
r_1	m	oberer Radius
r_2	m	unterer Radius
$d_{\text{Kübel}}$	m	oberer Küberldurchmesser
π	-	Kreiszahl $\approx 3,14159$
h_{Zylinder}	m	Zylinderhöhe
A_{Gesamt}	m ²	gesamte zu beschichtende Fläche
$A_{\text{Gerät}}$	m ²	gesamte zu beschichtende Fläche des Gerätes
$K_{\text{Gesamt } i}$	€	Gesamtkosten für ein Szenario
K_{Lohn}	€/h	Lohnkosten pro Stunde
$t_{\text{Reinigung}}$	h	Reinigungszeit
$t_{\text{TM Auftrag}}$	h	benötigte Zeit für den Trennmittelauftrag
$T_{\text{Beschichtung}}$	-	Halbbarkeitszeitraum der Beschichtung (in Arbeitstagen)
$K_{\text{Trennmittel}}$	€/l	Trennmittelkosten pro Liter
$V_{\text{Trennmittel}}$	l/m ²	Trennmittelverbrauch pro Quadratmeter Fläche
$K_{\text{vermindert } i}$	€	verminderte Gesamtkosten durch dauerhafte Beschichtung
$P_{\text{Grenz } i}$	€/m ²	maximal zulässiger Quadratmeterpreis für entsprechende Beschichtungen
$K_{\text{Transport}}$	€	Transportkostenpauschale

Einheitenverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
µm	Mikrometer
mm	Millimeter
cm	Zentimeter
dm	Dezimeter
m	Meter
mm ²	Quadratmillimeter
dm ³	Kubikdezimeter
l	Liter
g	Gramm
kg	Kilogramm
N	Newton
bar	Bar (1bar= 1,0*10 ⁵ N/m ²)
min	Minute
°C	Grad Celsius
HV	Härte nach Vickers
V	Volt

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Al_2O_3	Aluminiumoxid
a-C:H	amorphe, wasserstoffhaltige Kohlenstoffschichten
bzw.	beziehungsweise
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Calciumhydroxid
CaO	Calciumoxid
CSH	Calciumsilicathydrat
CVD	chemical vapour deposition (chemische Gasphasenabscheidung)
Cr	Chrom
d.h.	das heißt
DLC	diamond-like-carbon (diamantähnliche Kohlenstoffschichten)
$(\text{Cr}_2\text{O}_7)^{2-}$	Dichromat-Ion
e^-	Elektron
EM	Emaile
Fe_2O_3	Eisen(III)-oxid
FEP	Fluorethylenpropylen
GL	Gleitlack
HC	Hartchrom
OH^-	Hydroxid-Ion
H_2PO_2^-	Hypophosphit-Ion
KSW	Korrosionsschutzwachs
MTO	metal turn over (Anzahl vollständiger Nachdosierungen der Metall-Ionen)
Ni	Nickel
Ni-T	Nickeldispersion mit Teflonpartikeln
Ni^{2+}	Nickel-Ion
Ni/P	Nickel-Phosphor
H_2PO_3^-	Orthophosphit-Ion
P	Phosphor
H^+	Proton
PECVD	plasma enhanced chemical vapour deposition
PFA	Polyfluoralkoxylalkan
PTFE	Polytetrafluorethylen (Markenbezeichnung: Teflon)
NSS	Salzsprühnebeltest

SiO ₂	Siliziumoxid
TFE	Tetrafluorethen
H ₂ O	Wasser
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Im Bauwesen ist Beton als moderner und vielseitiger Baustoff nicht mehr wegzudenken. Egal ob Spannbetonkonstruktionen für Brücken, Spritzbeton zum Stabilisieren von Tunnelwänden oder Waschbeton für den Autobahnbau, immer häufiger spielt Beton die wortwörtlich tragende Rolle bei der Umsetzung von Bauprojekten. Allerdings bringt der Einbau von Beton auch Probleme mit sich. So notwendig der Prozess der Aushärtung für die Anwendung von Beton ist, so nachteilig wirkt sich dieser Vorgang auf die Wiederverwendbarkeit von Baumaschinen und Werkzeugen aus. Die starke Anhaftung von Betonrückständen an den Oberflächen von Gerätschaften und Maschinen erfordert eine zeitaufwendige Reinigung mit starken Säuren und macht häufig ein mechanisches Entfernen der Betonkruste mit Hammer und Meißel nötig. Abbildung 1 zeigt beispielhaft einen betonverkrusteten Kübel nach dem Einsatz auf der Baustelle. Ohne die aufwendigen Reinigungen sind solche Geräte nach dem Baustelleneinsatz nicht mehr verwendbar. Das Entfernen der harten Betonkruste mit der "Hammermethode" ist nicht nur zeitaufwendig, sondern führt nicht selten zu stark beschädigten Oberflächen und verbeulten Bauteilen. Für einen großen Teil der möglichen Anwendungen scheiden auf diese Art und Weise beschädigte Bauteile und Werkzeuge aus. [1]

Die immer größer werdende Konkurrenz im Bauwesen führt zu steigenden Ansprüchen an die Qualität von Betonflächen. Vor allem bei der Herstellung von Sichtbetonflächen ist daher auf eine fehlerfreie Oberfläche der verwendeten Schalungen zu achten. Eine unzureichende Trennung zwischen Schaloberfläche und der frischen Betonfläche, führt beim Ausschalen zu rauen und ungleichmäßigen Oberflächen, die durch den Abriss der obersten Zementleimschicht verursacht werden. Auch die Oberflächen der betonverarbeitenden Maschinen und Geräte müssen vollständig von Altbetonrückständen befreit werden, um fleckige Fehlstellen und den Einbau von Verkrustungen in die frische Betonoberfläche zu vermeiden. Um diesen Aufwand zu umgehen, werden aus Wirtschaftlichkeitsgründen meist neue Geräte und Schalungen verwendet. Die entstehenden Kosten sind trotzdem enorm.

Nach dem aktuellen Stand der Technik werden verschiedene Trennmittel eingesetzt, um dieser Problematik zu begegnen. Trennmittel sollen ein Abbinden des Betons auf der Bauteil- bzw. Schalungsoberfläche verhindern. Sie sorgen für die physikalische Trennung zwischen den Oberflächen der Maschinenkomponenten und dem Beton. Im Praxiseinsatz ergeben sich allerdings auch hierbei einige Probleme. So müssen die gereinigten Oberflächen sachgerecht mit dem

Trennmittel benetzt werden, um einer Betonanhaftung effektiv vorzubeugen. Der sachgerechte Umgang mit dem Trennmittel ist leider nicht auf jeder Baustelle gewährleistet.

Trennmittelfilme müssen möglichst dünn auf die Oberfläche aufgetragen werden, um eine ausreichende Haftung an den zu schützenden Oberflächen zu gewährleisten. Werden die Trennmittel dagegen zu dick aufgetragen, so wird sich der Trennmittelfilm beim ersten Kontakt mit dem Beton von der Oberfläche lösen, sodass kein Schutzeffekt gegen die Anhaftung mehr zu erwarten ist (siehe dazu Kapitel 1.3. "Wirkung und Anwendung von Trennmitteln"). Natürlich verursacht die Bereitstellung von Trennmitteln zusätzliche Kosten für die Baustellen. Zusätzlich erschweren viele Trennmittel Nachfolgebeschichtungen, wie das Auftragen von Putz oder Farbe, da Teile des Trennmittels auf der frischen Betonoberfläche verbleiben. [2]

Obwohl durch die schützende Wirkung der Trennmittel bei sachgerechter Verwendung von einer Zeitersparnis bei der Maschinenreinigung ausgegangen werden kann, muss vor jedem Einbau zunächst der Schutzfilm auf die Oberfläche aufgebracht werden. Somit besteht auch hier ein enormes Einsparpotenzial für die Baustellen, wenn man langfristig auf den Einsatz von Trennmitteln verzichten könnte, ohne dabei eine aufwendige Reinigung der Baumaschinen von ausgehärteten Betonresten zu riskieren. Dafür müsste eine Oberflächenbeschichtung entwickelt werden, welche dieselben positiven Effekte wie die Trennmittel aufweist, ohne ständig regeneriert werden zu müssen. Die Beschichtung sollte dem Beton also keine Möglichkeit zur Anhaftung bieten. Gleichzeitig muss die Schicht möglichst hart sein, um dem abrasiven Verschleiß, welcher durch den Beton hervorgerufen wird, stand zu halten.

Für eine entsprechende Beschichtung gäbe es ein breites Anwendungsspektrum im Bauwesen. Zunächst könnten die Kosten für die Trennmittel eingespart werden. Hinzu käme eine große Zeitersparnis, da die Maschinen und Werkzeuge nicht mehr vor jedem Arbeitsgang mit Trennmittel benetzt werden müssten. Hierdurch ergäben sich geringere Lohnkosten, beziehungsweise eine Steigerung der Produktivität. Auch für die Herstellung von Sichtbetonflächen wäre die Entwicklung einer solchen Beschichtung besonders interessant, da die beschichteten Schalungen und Werkzeuge mit geringerem Reinigungsaufwand erneut für Sichtbetonflächen eingesetzt werden könnten. Damit könnte dem Trend der Einmalnutzung für Sichtbetonflächen entgegengewirkt werden. Auch bautechnologisch ergäben sich Vorteile. Nachfolgebeschichtungen wären durch den Wegfall der Trennmittelrückstände auf den frischen Betonoberflächen sicherer durchführbar.

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung verschiedener Beschichtungsalternativen, welche die Anhaftung von Beton an den Oberflächen minimieren sollen. In Zusammenarbeit mit der BMTI GmbH und der Hochschule Mittweida wurde ein

Versuchsaufbau entwickelt, der einen Vergleich der verschiedenen Beschichtungsoptionen ermöglicht und die Tauglichkeit für einen Einsatz in der Praxis untersuchen soll.

Für die langfristige Entwicklung einer entsprechenden Beschichtung, kann diese Arbeit in erster Linie als Grundlage für weiterführende Untersuchungen und Versuche dienen. Hauptgegenstand der Untersuchungen soll die Problematik der Anhaftung sein. Wenngleich der Aspekt der Verschleißbeanspruchung durch den Beton bei der Auswahl der untersuchten Beschichtungen berücksichtigt wurde, sind zusätzliche Versuche zu diesem Thema unbedingt erforderlich, um einen erfolgreichen Praxiseinsatz zu gewährleisten.



Abbildung 1 stark verunreinigter Betonkübel nach dem Baustelleneinsatz



1.2 Moderner Baustoff - Beton

1.2.1 Allgemeine Zusammensetzung und Unterteilungen

Beton war der meist verwendete Baustoff des vergangenen Jahrhunderts und wird aufgrund seiner Vielseitigkeit auch in Zukunft seine dominante Rolle in der Baubranche behaupten. Zudem ist Beton mit ca. 0,05Euro pro Kilo ein vergleichsweise günstiger Baustoff, ohne den viele moderne Bauwerke nicht realisierbar gewesen wären[3]. Im folgenden Abschnitt soll kurz zusammengefasst werden, woraus sich dieser künstliche Stein zusammensetzt und welche Arten von Beton unterschieden werden.

Allgemein kann Beton den Teilchenverbundwerkstoffen zugeordnet werden, welche aus einem Matrixmaterial bestehen, in das Partikel verschiedener Größen eingelagert sind[4]. Im Wesentlichen besteht Beton aus einem Gemenge keramischer Stoffe unterschiedlicher Teilchengröße, das durch ein Bindemittel verklebt wird. Die Teilchengrößen sind durch die "Sieblinien" der einzelnen Bestandteile gekennzeichnet (z.B. Sand: 0,06 bis 2mm; Kies 2 bis 60mm) [5]. Durch die unterschiedlichen Teilchengrößen werden Hohlräume im Betongemisch ausgefüllt, sodass eine gute Raumausfüllung und eine hohe Dichte erreicht werden. Aufgrund der guten Raumausfüllung ist Beton mit einer hohen Druckfestigkeit gekennzeichnet. Eine gute Zugfestigkeit wird hingegen nur im Verbund mit Stahl (Stahlbeton) erreicht, da Beton Spannungsspitzen nicht durch Deformation abbauen kann. Tabelle 1 zeigt die Einteilung von Normalbeton nach Druckfestigkeitsklassen gemäß DIN 1045-1 und DIN 1045-2. Neben einer Einteilung in Festigkeitsklassen kann Beton laut DIN 1045 nach der Dichte in Leichtbeton ($<2,0\text{kg/dm}^3$), Normalbeton ($2,0\text{-}2,8\text{kg/dm}^3$) und Schwerbeton ($>2,8\text{kg/dm}^3$) unterteilt werden[7]. Üblich ist auch eine Unterteilung der Betonsorten nach Art der Verwendung (wie z.B. Spritzbeton, Wasserunterbeton, Walzbeton) beziehungsweise eine Gruppierung nach den Eigenschaften oder der Art des Verbundes (z.B. Stahlbeton, Polymerbeton, Faserbeton).

Überwachungs- klasse	Festigkeitsklasse	charakteristische Zylinder- druckfestigkeit f_{ck} (N/mm ²)	Mittelwert der Zylinder- druckfestigkeit f_{cm} (N/mm ²)	Mittlere Zugfestigkeit(N/mm ²)
1	C8/10*	8	-	-
C12/15	12	20	1,6	
C16/20	16	24	1,9	
C20/25	20	28	2,2	
C25/30	25	33	2,6	
2	C30/37	30	38	2,9
C35/45	35	43	3,2	
C40/50	40	48	3,5	
C45/55	45	53	3,8	
C50/60	50	58	4,1	
3	C55/67	55	63	4,2
C60/75	60	68	4,4	
C70/85	70	78	4,6	
C80/95	80	88	4,8	
C90/105	90	98	5,0	
C100/115	100	108	5,2	

Tabelle 1 Druckfestigkeitsklassen für Normalbeton nach DIN 1045-1 und DIN1045-2 [6]

1.2.2 Bindemittel Zement

Die Festigkeit des Betons wird durch die Aushärtung des Bindemittels erreicht. Für Betonmischungen wird Zement als Bindemittel verwendet. Der Zement gehört zur Gruppe der anorganischen Bindemittel. Durch Zugabe von Wasser verfestigt sich der Zement durch eine chemische Reaktion, weshalb Zement zu den hydraulischen Bindemitteln gezählt wird.

Hergestellt wird Zement durch das Brennen von Kalkstein und Ton (z.B. Mergel). Das Sinterprodukt wird anschließend zermahlen. Hauptbestandteil des zermahlenden Zementklinkers sind dabei die Klinkerminerale Calcium- und Siliciumoxid (über 80%), sowie Eisen(III)- und Aluminiumoxid [7]. Die wichtigsten Klinkerphasen und ihre Masseanteile sind in Tabelle 2 dargestellt.

Klinkerphase	Oxidschreibweise	Abkürzung Bauchemie	Farbe reine Phase	Anteil in %	
				Bereich	Mittelwert
Alit Tricalciumsilicat	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	weiß	40...80	65
Belit Dicalciumsilicat	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	weiß	2...30	13
Aluminatphase Tricalciumaluminat	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	weiß	3...15	11
Ferritphase Calciumaluminatferrit	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_2(\text{A},\text{F})$	dunkel- braun *	4...15	8

Tabelle 2 Übersicht über wichtige Zementklinkerphasen [8]

Durch Zugabe von Wasser reagieren die Verbindungen im Zement in einer Hydratationsreaktion zu Calciumsilicathydrat-Phasen (CSH-Phasen), welche nicht mehr in Wasser gelöst werden können. Aus diesem Grund kann Beton auch unter Wasser aushärten. Die CSH-Phasen bilden kleine Kristallnadeln ($<1\mu\text{m}$), die sich fest miteinander verzahnen. Der Aushärtungsprozess kann je nach Betonformulierung mehrere Wochen in Anspruch nehmen. In verschiedenen Nebenreaktionen entstehen Hydroxide, wie z.B. Calciumhydroxid $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, der sogenannte Portlandit. Diese Verbindungen verringern die Festigkeit in der Grenzzone zwischen Zement und Gesteinskörnung und werden mit Hilfe von puzzolanischen Zuschlagstoffen zu Calciumsilicathydrat-Phasen umgewandelt.

Die DIN EN 197-1 unterteilt den Zement in fünf Hauptzementarten: Portlandzement (CEM I), Portlandkompositzement (CEM II), Hochofenzement (CEM III), Puzzolanzement (CEM IV), Kompositzement (CEM V). Diese Hauptzementarten werden entsprechend der Zugabemenge ihrer Hauptbestandteile in weitere 27 Zementarten unterteilt. [9]

1.2.3 Betonzusatzmittel

Neben dem Mischungsverhältnis aus Zement, Wasser und Zuschlagstoffen, werden Eigenschaften und Verarbeitbarkeit von Beton heute vor allem durch zahlreiche Additive beeinflusst. Möglicherweise wirken sich diese Beimischungen allerdings nicht nur auf Eigenschaften und Verarbeitbarkeit des künstlichen Gesteins aus, sondern haben auch Einfluss auf die Anhaftung des Betons an den Oberflächen von Werkzeugen und Schalungen. Im folgenden Abschnitt sollen einige marktübliche Betonadditive und ihr Einfluss auf den Beton beschrieben werden.

Der Wasseranteil in der Betonmischung, der sogenannte Wasserzementwert, ist entscheidend für die spätere Festigkeit des Betons. Je mehr Wasser die Mischung enthält, desto geringer wird die erreichbare Festigkeit. Für die Verarbeitbarkeit ist es aber häufig von Vorteil Beton mit einer geringen Viskosität einzubauen. Das erleichtert das Pumpen und das Verdichten des Betons mittels Rüttelflaschen. Um die Wassermenge zu reduzieren, werden Betonverflüssiger und Fließmittel (z.B. Naphthalinsulfonate, Ligninsulfonate) eingesetzt. Diese verbessern die Dispergiereigenschaften und sorgen so für eine geringere Viskosität des Betons. [10]

Für die Deckenabsicherung im Tunnelbau wird Spritzbeton verwendet (Abbildung 2). Um ein möglichst schnelles Abbinden des Betons an der Tunneldecke zu erreichen, wird dem Beton ein Erstarrungsbeschleuniger (BE-Mittel) zugesetzt. Dadurch wird die Hydratationsreaktion beschleunigt. Neben der Anwendung im Tunnelbau werden die Beschleuniger auch für den Betoneinbau bei tiefen Temperaturen benötigt. Für lange Transporte kann dem Frischbeton auch ein Erstarrungsverzögerer zugesetzt werden, der die chemische Aushärtungsreaktion hemmt. [10]

Eines der am häufigsten eingesetzten Additive sind sogenannte Luftporenbildner. Dabei handelt es sich um nichtionische Tenside, die für eine stabile Schaumbildung sorgen. Die entstandenen Luftporen verbleiben auch im ausgehärteten Zustand im Beton und senken die Dichte. Gleichzeitig verliert der Beton etwas Druckfestigkeit. Die geringere Dichte führt zu einem leichteren Beton, der zudem besser verarbeitbar ist. Außerdem wird der Frostwiderstand erhöht, da eingedrungenes Wasser sich zunächst in den Hohlräumen im Beton ausbreiten kann. [11] Die Luftporen verringern theoretisch die wirksame Adhäsionsfläche zwischen Bauteiloberfläche und Beton. Ob dieser Effekt einen messbaren Einfluss auf die Trennkraft nimmt, wurde in Versuch III untersucht (siehe dazu Kapitel 4.4).



Abbildung 2 Spritzbeton für die Sicherung von Wänden und Decken im Tunnelbau [12]

1.3 Wirkung und Anwendung von Trennmitteln

Um einen objektiven Vergleich zwischen den mit Hilfe von Trennmitteln erzielten Versuchsergebnissen und den Ergebnissen der mit einer dauerhaften Beschichtung versehenen Proben ziehen zu können, sollten zunächst die Grundlagen der Trennwirkung von Schalölen und ähnlichen Produkten erläutert werden.

Allen Trennmitteln ist gemein, dass sie für eine physikalische Trennung zwischen Stahloberfläche und Beton sorgen, sodass eine Anhaftung des Betons verhindert werden kann. Man unterscheidet Trennmittel lediglich in chemisch reagierende und nicht chemisch reagierende Trennmittel. Typische Betontrennmittel, die nicht chemisch reagieren sind Paraffine, Wachse oder Silikonöle. Durch das Aufbringen dieser Substanzen auf die Oberfläche wird eine Hydrophobierung der Oberfläche erreicht, wodurch eine Trennung vom wasserfreundlichen Beton erreicht wird. Auf unbeschichteten Stahloberflächen finden sich stets wasserfreundliche Bereiche die durch Eisenoxide (z.B. Fe_2O_3 ; Fe_3O_4) oder Eisenhydroxide ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) verursacht werden. Diese Oberflächenbereiche werden durch die Trennmittel benetzt und in wasserabweisende Oberflächen umgewandelt, sodass die wasserfreundlichen Calciumsilicatphasen im Zement keine Haftung zur Stahloberfläche aufbauen können. Dieser Effekt wird bei chemisch reagierenden Trennmitteln weiter verstärkt. Diese enthalten natürliche oder synthetische Fettsäuren, die mit den alkalischen Betonbestandteilen zu besonders trennwirksamen Substanzen reagieren. Das eigentliche Trennmittel, eine wasserunlösliche Seife (z.B. Calciumoleat), entsteht hierbei also erst aus der Reaktion zwischen Beton und Fettsäuren. Abbildung 3 zeigt die Reaktionsgleichung von Calciumhydroxid und einer Fettsäure zur Beton- oder Kalkseife. [13]

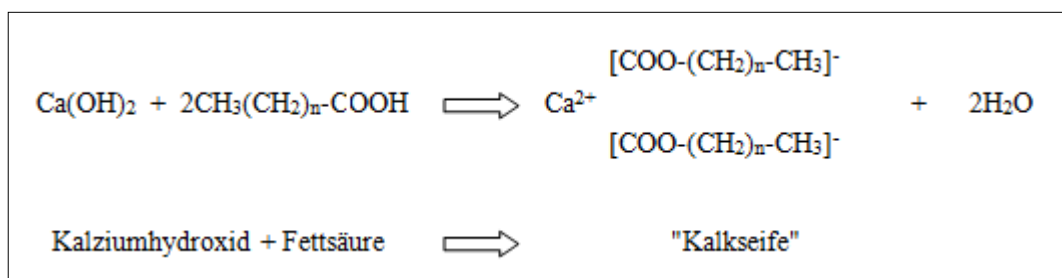


Abbildung 3 Reaktion von chemisch reaktiven Trennmitteln [13]

Das Aufbringen des Trennmittelfilms erfolgt auf den Baustellen meist mit mobilen Pumpsprühgeräten und feinen Düsen mit einem möglichst großen Aufsprühwinkel von 60-80°. Idealerweise sollte in den Sprühgeräten ein Druck von 5 bis 6bar erreicht werden können. Das Aufbringen des Trennmittelfilms mit Hilfe der Sprühtechnik ist in Abbildung 4 dargestellt. Der aufgetragene Film sollte möglichst dünn sein, um eine ausreichende Anhaftung des Trennmittels an der Schalungsoberfläche zu gewährleisten. [14]

Die Haftkraft beruht auf Adhäsionskräften zwischen gereinigter Schalungsoberfläche und Trennmittel. Je größer der Abstand zur Schalungsoberfläche durch zunehmende Schichtdicke des Films wird, desto geringer werden die Adhäsionskräfte. [15]

Das Ziel bei der Anwendung von Trennmitteln, sollte folglich neben der vollständigen Benetzung der Oberfläche immer ein möglichst dünner Filmauftrag sein. Mit lösemittelhaltigen Trennmitteln sind fest anhaftende Filme von 4µm Schichtdicke realisierbar. Neben der Auswahl der Trennmittel nach den technischen Eigenschaften, also der Trennwirkung ohne Rückstände an den Betonflächen zu hinterlassen, werden Trennmittel heute auch aus ökologischen Gesichtspunkten betrachtet. In einer zunehmend für Arbeits- und Umweltschutz sensibilisierten Gesellschaft werden lösemittelhaltige, mineralölbasierte Trennmittelformulierungen zunehmend von wässrigen Emulsionen auf pflanzlicher Rohstoffbasis verdrängt. Die Produktionskosten für solche Trennmittel sind dabei zwar wesentlich höher, allerdings werden diese Produkte häufig vom Auftraggeber vorgeschrieben, um eine gewisse Umweltverträglichkeit zu garantieren. Angesichts dieser Entwicklung könnte der Kostenfaktor beim Einsatz von Trennmitteln für die Baustellen weiter steigen. [14]



Abbildung 4 Auftrag von Trennmittel mittels Sprüngerät und Flachdüse [16]

2 Versuchsaufbau und Vorbereitung

2.1 Versuchsaufbau

In Vorbereitung auf diese Arbeit wurde während des Praxismoduls ein reproduzierbarer Versuchsaufbau entwickelt, bei dem als Vergleichsgröße eine Trennkraft zwischen beschichteter Probenoberfläche und dem Beton ermittelt wird [17]. Die Trennung zwischen Probenoberfläche und Beton wird dabei durch das Aufbringen einer Druckkraft erreicht. Um einen möglichst einfachen Versuchsaufbau ohne Einwirkung von Querkraften auf die Messapparatur zu gewährleisten, wurden zylinderförmige Probekörper gewählt. Alle in Frage kommenden Beschichtungen konnten problemlos auf die Mantelfläche der Probezylinder aufgebracht werden. Nach erfolgreicher Beschichtung aller Probekörper erfolgte die Fertigung einer Mantelaufnahme bei Siemens Professional Education in Chemnitz. Die Aufnahme sollte sicherstellen, dass die Proben beim Austreiben der Zylinder aus dem Beton hohl aufliegen. Abbildung 5 zeigt den modellhaften Versuchsaufbau mit der Mantelaufnahme. Vor jedem Versuchsdurchlauf wurden die entsprechend beschichteten Probezylinder in Beton eingegossen, sodass eine ca. 5cm hohe Betonummantelung entstand. Hierfür wurden kurze Rohrabchnitte (Durchmesser 100mm) als Form verwendet. Nach Ablauf der Aushärtungszeit für den Beton wurden die Proben auf die Mantelaufnahme gelegt. Mit Hilfe eines Druckstempels konnten die beschichteten Zylinder aus der Betonummantelung gedrückt werden. Die Messmaschine zeichnete dabei die Kraftverläufe über dem zurückgelegten Weg auf. Die Messgeschwindigkeit wurde auf 10mm/min eingestellt. Die Messstrecke wurde auf 15mm begrenzt, da nach Überwindung der Haftkräfte lediglich die Reibungskräfte zwischen Beton und Probenoberfläche gemessen wurden. Der Versuch wurde mit der Universalmessmaschine der Hochschule Mittweida von Hegewald und Peschke durchgeführt. Die technischen Daten der Mess- und Prüfmaschine befinden sich in Anhang I.

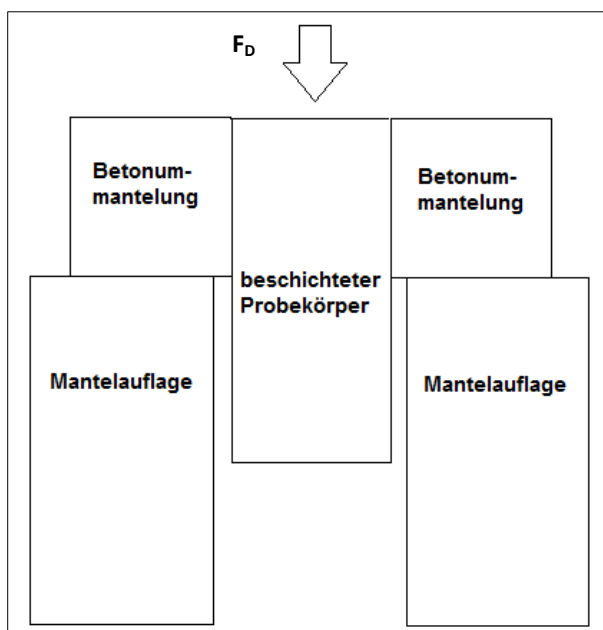


Abbildung 5 modellhafter Versuchsaufbau beim Trennen



Abbildung 6 Druckstempel beim Ausdrücken eines Probezylinders

Ansprechpartner für die Nutzungszeiträume und die Maschinenbedienung war Professor Müller. Abbildung 6 zeigt die Durchführung des Versuchs beim Trennen der wachsüberzogenen Probe von der Ummantelung. Insgesamt wurden drei Versuche durchgeführt. Die endgültigen Parameter wurden erst nach der Durchführung des ersten Versuchs festgelegt, da einige Einstellungen angepasst werden mussten (siehe dazu Kapitel 4.2). Zusätzlich wurden zwei Untersuchungen an unbehandeltem Stahl (S235JR+C), sowie an mit Divinol Trennmittel benetzten Proben, durchgeführt. Die Messergebnisse dieser Untersuchung sollten als Referenzwerte den Istzustand dokumentieren. Tabelle 3 gibt eine kurze Übersicht über alle durchgeführten Versuche.

Versuchsbezeichnung	untersuchte Beschichtungen	Aushärtungszeit für den Beton	Betonzusätze
Referenzwertbestimmung	Trennmittelfilm (Divinol B Classic); blanker Stahl	48h / 72h	-
Versuch I	Ni/P; HC; KSW; Ni-T; GL; DCL; EM; Teflon	48h	-
Versuch II	Ni/P; HC; KSW; Ni-T; GL; EM; Teflon	72h	-
Versuch III	Ni/P; HC; Ni-T; EM; Teflon	48h	0,4 M% Luftporenbildner

Tabelle 3 Übersicht über alle Versuche

2.2 Vorbereitung und Fertigung der Proben

Die Probezylinder für den Druckversuch wurden in der Lehrwerkstatt von Siemens Professional Education in Chemnitz gefertigt. Insgesamt wurden 20 Probezylinder für die spätere Beschichtung mit den zu untersuchenden Schichtalternativen gefertigt. Die Geometriedaten können der Skizze im Anhang entnommen werden (siehe Anhang II). Eine Messung der erreichten Oberflächengüten, die beim Schleifen erreicht wurden, war aufgrund fehlender Messgeräte nicht in der Lehrwerkstatt von Siemens möglich. Die Aufnahme der Rauigkeitsdaten wurde in der Hochschule Mittweida durchgeführt. In Zusammenarbeit mit Professor Wißuwa wurden die Rz-Werte von drei Probezylindern mittels Hommeltester (technische Daten in Anhang III) ermittelt. Die Teststrecke betrug 4,8mm, bei einem Cut Off von 0,8mm. Auf den Proben wurden jeweils drei Oberflächenabschnitte untersucht. Die größten Messwerte betrugen 2,81µm für Teil III. Da alle Probekörper auf derselben Schleifmaschine in einer Charge geschliffen wurden, kann die Oberflächengüte aller Proben mit $Rz < 3\mu m$ angegeben werden. Die Ergebnisse der Rauigkeitsmessung können dem Anhang entnommen werden (Anhang IV).

Die Überprüfung der Rauigkeitswerte vor der Beschichtung war wichtig um sicherzustellen, dass alle Proben im selben Ausgangszustand beschichtet wurden und somit die Vergleichbarkeit zwischen den Proben gewährleistet ist. Das Erreichen möglichst geringer Rauigkeitswerte war vor allem für den Überzug der Proben mit dünnen Kohlenstoffschichten und die Hartverchromung wichtig. Beim Hartverchromen führen zu raue Oberflächen zu einer starken zusätzlichen Aufrauung. Außerdem besteht die Gefahr der Warzenbildung beim Aufbringen der etwa 100µm dicken Chromschicht. [18] Nach dem Fertigen und Messen der Proben erfolgte die Beschichtung durch die jeweiligen Hersteller (siehe dazu Kapitel 3 "Untersuchte Beschichtungen").

2.3 Vorbereitung der Versuche

Um die verschiedenen Aushärtungszeiten des Betons einzuhalten, wurden alle Proben mit einem entsprechenden zeitlichen Vorlauf vor dem Versuchstermin in den Betonmantel eingehüllt. Der Beton wurde hierfür in einem 10-Liter Eimer (Abbildung 7) nach folgender Zusammensetzung angerührt:

- 4 Anteile Sand
- 2 Anteile Portlandzement
- 2 Anteile Splitt (2- 16mm Körnung)
- 1 Anteil Wasser



Abbildung 7 Betonmischung für Versuch I

Um ein Anhaften des Betons an den Betonförmchen zu vermeiden, wurden diese vor der Befüllung mit Beton mit einem Trennmittelfilm versehen. Die Benetzung mit dem Trennmittel Divinol Multiform B Classic wurde mit einem Pinsel durchgeführt. Da während des ersten Versuchs Probleme beim Lösen der Stahlformen auftraten, wenn diese während der gesamten Aushärtungszeit bis zum Versuch als begrenzendes Element um den Beton verblieben, wurden die Formen bei allen nachfolgenden Versuchen nach 12 Stunden entfernt. Durch große Hohlräume im Beton, beziehungsweise an der Grenzfläche zwischen Beschichtungsmaterial der Proben und dem Beton, kann das Ergebnis der Kraftmessung beim Trennen verfälscht werden. Es besteht die Gefahr, dass die Anhaftung nicht über die gesamte Fläche stattfindet, sodass eine genaue Flächenbestimmung nicht möglich und somit die Vergleichbarkeit der Proben gefährdet wäre. Um diesem Problem entgegen zu wirken, wurde der Betonmantel leicht verdichtet. Hierfür wurde ein Holzstab genutzt. Durch manuelles Rütteln wurden größere Lufteinschlüsse verhindert. Bilder zum Trennmittelauftrag und dem Verdichten des Betonmantels befinden sich im Anhang dieser Arbeit (siehe Anhang V).

3 Untersuchte Beschichtungen

3.1 Anforderungen und Auswahl der Beschichtungen

Für die Beschichtung der Bauteile gegen das "Anbacken" von Betonresten beim Einbau wurden bereits zwei wichtige Eigenschaften in den Vordergrund gestellt. Zunächst sollte eine Antihaftwirkung erreicht werden. Für die Wirkungsweise von Trennmitteln beschreibt Schumann in seinem Werk die Hydrophobierung der Oberfläche gegenüber dem hydrophilen Beton als Grundvoraussetzung, um das Anhaften des Betons an Schalungs- und Werkzeuoberflächen zu vermeiden [13]. Zusätzlich muss die Schicht eine gewisse Verschleißfestigkeit gegen Beton aufweisen, damit eine ausreichend wirtschaftliche Lebensdauer der Beschichtung gegeben ist.

Forschungen zum Thema Betonanhaftung befassen sich nahezu ausschließlich mit der Optimierung und dem nachhaltigen Einsatz von Trennmitteln. Wie bereits erwähnt, kann keines der verfügbaren Produkte einen dauerhaften Schutz gegen Betonverkrustungen bieten. Da keine Untersuchungsergebnisse zur Problematik der Betonanhaftung an dauerhaft beschichteten Stahloberflächen vorliegen, konnte nicht auf eine grundlegende Erfahrung für die Eignung der Schichten zurückgegriffen werden. Die untersuchten Beschichtungsoptionen wurden daher nach den Hauptmerkmalen, nämlich einer guten Verschleißfestigkeit und einer geringen Oberflächenenergie für eine erschwerte Benetzung, ausgewählt. Da ebenfalls keine Erfahrungen über den Einfluss der Oberflächenrauigkeit und der Gleiteigenschaften der Beschichtung bei einer Verschmutzung mit Betonresten und einer anschließenden Reinigung vorliegen, sollten auch Schichten mit guten Reibwerten und geringen Reibungskoeffizienten untersucht werden. Damit die Kosten, sowohl für den Versuch selbst, als auch für eventuell folgende Beschichtungen niedrig gehalten werden können, wurde bei der Auswahl der Beschichtungsmöglichkeiten auch Augenmerk auf die Verfügbarkeit und die Preisgestaltung von möglichen Beschichtungen gelegt. Marktübliche Beschichtungen bringen im Allgemeinen geringere Kosten mit sich. Außerdem sind die Verfahren meist ausgereift und alle Einflussparameter bekannt und steuerbar. Weiterhin wurde versucht die Beschichtung der Proben durch regional ansässige Unternehmen durchführen zu lassen oder die Beschichtung selbst vorzunehmen.

Ein breites Spektrum an Möglichkeiten für eine geeignete Beschichtung bieten die Metallschichten. Dabei lassen sich durch die richtige Schichtauswahl oder eine nachträgliche Wärmebehandlung der Schichten hohe Härtewerte erreichen, die mit einer guten Verschleißfestigkeit einher gehen. Dabei bleibt allerdings zu beachten, dass der Verschleiß einer Oberfläche je nach Reibpartner stark variieren kann. Metallschichten lassen sich mit sehr guten Gleiteigenschaften gegen andere Metalle herstellen. Hinzu kommt als positiver Nebeneffekt der

Korrosionsschutz, den einige Metallschichten aufweisen können. Kanani beschreibt in seinem Werk die wichtigsten Eigenschaften der üblichen Metall- und Legierungsschichten [19]. Wegen der aufgeführten Vorteile, was Verschleißfestigkeit und Korrosionsschutz angeht, wurden rund die Hälfte der untersuchten Probezylinder mit einer Metallschicht versehen. Um ein breites Feld an Alternativen untersuchen zu können, sind jedoch auch organische und anorganische Nichtmetallschichten untersucht worden. Im folgenden Abschnitt sollen die gewählten Schichtalternativen kurz vorgestellt werden.

3.2 Nickel-Phosphorschichten

3.2.1 Herstellung

Nickel-Phosphorschichten sind Legierungen die chemisch, das heißt ohne Verwendung einer äußeren Stromquelle ("Electroless Nickel"), aus wässrigen Elektrolyten abgeschieden werden können. Abbildung 8 zeigt den schematischen Ablauf der Abscheidung. Der Elektrolyt enthält ein Nickelsalz, welches die Nickel-Ionen zur Verfügung stellt, und ein Reduktionsmittel, welches als Elektronenlieferant fungiert. Als Nickelsalz wird häufig Nickelsulfat (NiSO_4) eingesetzt, während Natriumhypophosphit (NaH_2PO_2) das meist verwendete Reduktionsmittel darstellt. Während der Beschichtung laufen folgende Reaktion ab:

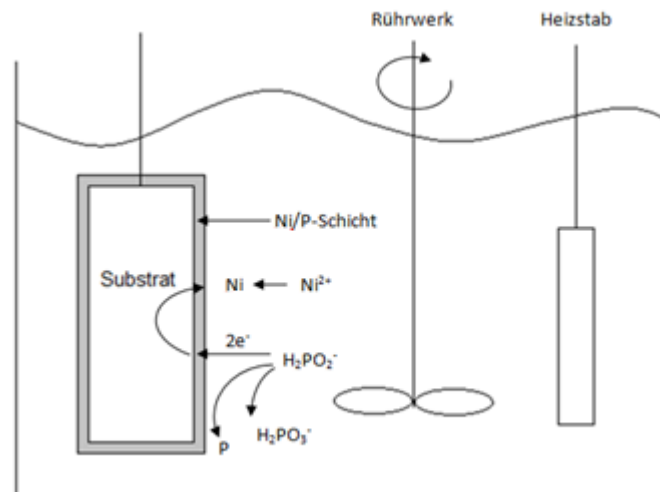
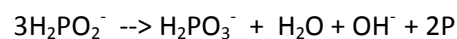
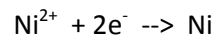
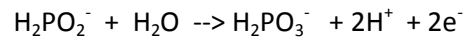


Abbildung 8 Prinzip der autokatalytischen Abscheidung von Ni/P-Schichten [20]

Die Elektronen, die bei der Entstehung des Orthophosphit-Ion (H_2PO_3^-) frei werden, reduzieren die Nickel-Ionen an der Oberfläche zu Nickel. Parallel bildet sich aus dem Hypophosphit elementarer Phosphor, der in die Schicht eingebaut werden kann. Während der Schichtabscheidungsreaktion wird sowohl das Nickelsalz, als auch das Reduktionsmittel verbraucht und muss nachdosiert werden. Durch die Anreicherung von Orthophosphit im Elektrolyten wird das Badalter auf 5-10 MTO begrenzt. Damit die Reaktion nicht unkontrolliert bereits beim Ansetzen der Elektrolytlösung stattfindet, wird für die Reduktionsreaktion zu metallischem Nickel ein Katalysator benötigt. Die Reaktion verläuft autokatalytisch, das heißt nach dem Start der Schichtbildungsreaktion dient das abgeschiedene Nickel als Katalysator für die ablaufende Reaktion an der Substratoberfläche. Somit wird ein weiteres Aufwachsen der Schicht erst durch die Reduktion aller Nickel-Ionen im Elektrolyten, beziehungsweise durch das Entfernen des Substrates aus dem Nickelbad, unterbrochen. Um die Abscheidung zu starten wird die Substratoberfläche als Katalysator gebraucht. Wirkt die Oberfläche nicht von selbst als Katalysator um die Reaktion zu starten, muss diese durch "Bekeimen" mit einem geeigneten Metall, wie Eisen, Kobalt, Nickel oder Palladium, katalytisch gemacht werden. Durch die katalytische Wirkung von Nickel ist es möglich, bekeimte Kunststoffoberflächen mit Nickelüberzügen zu versehen.[20]

3.2.2 Eigenschaften und Verwendung

Nickelschichten lassen sich chemisch mit verschiedenen Phosphorgehalten abscheiden, wobei der Anteil an Phosphor in der Schicht großen Einfluss auf die Eigenschaften der Beschichtung hat. So weisen Schichten mit einem höheren Phosphorgehalt auch eine höhere Korrosionsbeständigkeit auf als phosphorarme Schichten. Die Mikrohärtigkeit steigt dagegen, wenn der Phosphoranteil der Nickelschicht sinkt. Durch eine gezielte Wärmebehandlung können Nickel-Phosphorschichten nach der Schichtabscheidung in ihren Eigenschaften weiter beeinflusst werden. So ist durch das sogenannte "Tempern" eine Steigerung der Härte auf bis zu 1200HV möglich. Diese Härtesteigerung wirkt sich auch positiv auf die Beständigkeit der Schicht gegen abrasiven Verschleiß aus. Eine Steigerung von Härte und Verschleißfestigkeit geht üblicherweise mit einem gewissen Verlust von Duktilität einher.

Neben der hohen Härte und der guten Verschleißfestigkeit bieten Nickelschichten einen exzellenten Korrosionsschutz. So hält eine 25-50 μm starke Nickelschicht dem Neutralen Salzsprühnebeltest (NSS) über 800 Stunden stand. Es besteht die Möglichkeit glänzende Schichten zu erzeugen. Ein großer Vorteil der chemischen Vernickelung ist die absolute Konturtreue, durch die auch komplexe Geometrien gleichmäßig beschichtet werden können. Der

Unterschied in der Schichtdickenverteilung beim Vergleich mit galvanisch abgeschiedenen Nickelschichten ist in Abbildung 9 dargestellt.

In der Industrie gibt es bereits zahlreiche Anwendungsgebiete für Nickel-Phosphorschichten. Sowohl im Maschinenbau, als Unternickelung für Hartchromschichten, Verschleißschutz für Kugellager, Ventile oder Zahnräder, als auch in der Elektrotechnik für die Beschichtung von Leiterplatten oder die Beschichtung von Datenspeichern werden Ni/P - Schichten seit Jahren erfolgreich eingesetzt. [20]

Eine weitere Optimierung der Schichteigenschaften kann durch die Verwendung von Dispersions-
teilchen erreicht werden (siehe dazu 3.2.3. Ni/P - PTFE).

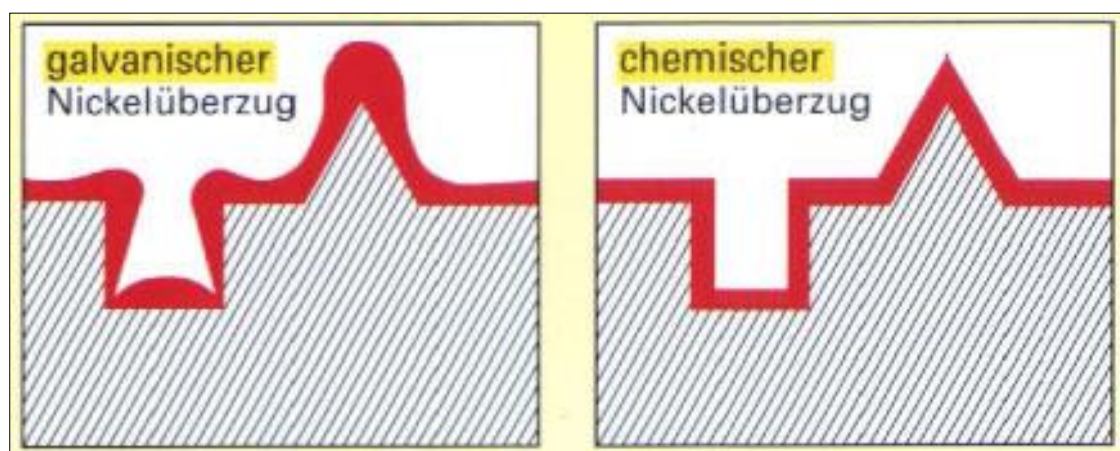


Abbildung 9 Vergleich der Konturtreue von galvanischen und chemischen Nickelschichten [21]

3.2.3 Ni/P - PTFE

Die in der Technik oft geforderten Eigenschaften nach hoher Verschleißbeständigkeit, bei gleichzeitig geringem Reibwiderstand und guten Gleiteigenschaften, wie sie auch für das vorliegende Problem benötigt werden, sind mit konventionellen Beschichtungsmethoden oft nicht mehr zu erreichen. Schichten mit ausreichend guten Gleiteigenschaften fehlt es oft an Härte, um die Oberfläche gegen abrasiven Verschleiß zu schützen. Umgekehrt verhält es sich bei sehr harten Schichten. Um beide Eigenschaften miteinander zu vereinen, bilden Dispersionsschichten häufig einen guten Kompromiss.

Unter Dispersion versteht man dabei eine feinstverteilte Phase von Fremdpartikeln im Elektrolyten. Die Partikel liegen kolloidal in der Elektrolytlösung vor und können die Eigenschaften der abgeschiedenen Schicht maßgeblich verändern. [22]

Um die Verschleißfestigkeit von Nickel-Phosphorschichten zu steigern, werden der Elektrolytlösung ca. 15% harte Feststoffe wie Diamant-, Siliciumcarbid- und Borcarbidpartikel

zugeführt. So können stark abrasiv beanspruchte Bauteile noch besser vor Verschleiß geschützt werden. Durch die Einlagerung der Hartstoffpartikel lässt sich der Reibungskoeffizient gezielt erhöhen. Das wird zum Beispiel für kraftschlüssige Verbindungen im Motorenbau genutzt, um definierte Drehmomente zwischen Kurbel und Nockenwelle präzise zu übertragen. Durch den Einbau von Trockenschmierstoffen kann der Reibungskoeffizient dagegen stark vermindert werden. Dadurch können Reibung und Verschleiß von Lagern, Wellen oder Antriebsteilen enorm gesenkt werden, ohne auf die Vorteile der chemischen Vernicklung verzichten zu müssen. Viele Beschichtungsunternehmen bieten solche Nickel-Dispersionsschichten bereits an. [23]

Mögliche Trockenschmierstoffe, die für den Einbau in die Metallmatrix in Frage kommen sind PTFE (häufig als Teflon bezeichnet), Molybdänsulfid, PFA oder hexagonales Bornitrid. Im Gegensatz zu den Hartstoffpartikeln handelt es sich meist um runde, relativ weiche Einlagerungen, die den Reibungskoeffizienten für die meisten Reibpartner senken. Neben den verbesserten Gleiteigenschaften zeigen Nickel-Teflon-Schichten ein antiadhäsives und hydrophobes Verhalten. Durch den Einbau der Trockenschmierstoffe in die Metallmatrix verlieren die Schichten allerdings deutlich an Härte [22;23]. Nickel-PFA weisen ähnliche Eigenschaften auf, werden aber nicht in derselben Breite wie PTFE-Dispersionen angeboten. Daher erscheinen die Nickel-Teflon-Schichten als geeignete Möglichkeit, einer Betonanhaftung erfolgreich vorzubeugen.

Das Unternehmen AHC Oberflächentechnik bietet neben den klassischen Nickelphosphorschichten auch ein spezielles Verfahren zur Abscheidung von Ni/P- Schichten mit PTFE-Einlagerungen an. Das Verfahren ist unter dem Markennamen PTFE-DURNI-DISP auf dem Markt. In der Elektrolytlösung werden 20-30% PTFE in Schwebelösung gehalten und in die Nickelschicht eingebaut. Dadurch kann der Reibungskoeffizient der Nickelschicht deutlich gesenkt werden und man erhält eine Beschichtung mit antiadhäsiven Eigenschaften. Außerdem bieten die 10-15µm dicken Schichten, nach Angaben von AHC, einen guten Widerstand gegen adhäsiven Verschleiß.[24]

Aufgrund der genannten Eigenschaften von Ni/P-Schichten mit eingelagerten Teflonpartikeln wurden zwei Probezylinder von AHC mit dem PTFE-DURNI-DISP-Verfahren beschichtet.

3.2.4 Herstellung der Ni/P-Schicht in der Hochschule Mittweida

Neben der externen Beschichtung zweier Probezylinder durch die AHC Oberflächentechnik, wurden zwei weitere Probekörper mit einer deutlich härteren Nickel-Phosphor-Legierung beschichtet. Die Untersuchung dieser Schichten sollte zeigen, ob mit härteren Schichten, die eine deutliche Steigerung der abrasiven Verschleißfestigkeit versprechen, ebenfalls befriedigende Antihafteigenschaften gegen das Anbacken von Betonrückständen erreicht werden können. Die Probekörper konnten in der Hochschule Mittweida beschichtet werden. Ansprechpartner für die Nutzung der Räumlichkeiten und Chemikalien war Professor Köster. Im folgenden Abschnitt soll die Durchführung der Beschichtung beschrieben werden.

Beide Zylinder konnten in einem großen Becherglas mit ca. 1,5 Liter Elektrolytlösung, mit einem Nickelüberzug versehen werden. Der Aufbau für die Nickelbeschichtung ist in Abbildung 10 dargestellt. Für den Ansatz des Elektrolyten wurde DURNI-COAT Ansatzlösung von AHC Oberflächentechnik verwendet. Der Nickelgehalt des Bades wurde mit den Regenerationslösungen I eingestellt und sollte sich laut Herstellerdatenblatt zwischen 4,5 und 5,5 g/l bewegen (siehe Datenblatt Anhang VI). Die Konzentration von Nickelionen in der Lösung wurde mit Hilfe eines Photometers in regelmäßigen Abständen überprüft und entsprechend eingestellt.

Regenerationslösung II enthielt das Reduktionsmittel Natriumhypophosphit und wurde der Lösung im selben Verhältnis wie das Nickelsalz zugeführt, da Reduktionsmittel und Nickelsalz während der Beschichtung gleichmäßig aufgebraucht werden. Laut den Herstellerangaben sollte der pH-Wert der Elektrolytlösung zwischen 4,9 und 5,1 im leicht sauren Bereich gehalten werden (siehe Datenblatt Anhang VI). Da das Nachdosieren der Elektrolytlösung mit den beiden sauren Regenerationslösungen den pH-Wert ständig senkte, erfolgte die Einstellung des pH-Wertes mit Ammoniaklösung. Die Badtemperatur wurde mit Hilfe einer Heizplatte auf ca. 88°C gehalten. Eine gute Konvektionsbewegung des Elektrolyten war nicht möglich, da das Magnetrührstäbchen von den Stahlzylindern angezogen wurde und deshalb aus dem Becherglas entfernt werden musste. Als Problematisch erwies sich weiterhin das Fehlen eines Filters, um Verunreinigungen und Nickelpartikel aus der Lösung zu entfernen. Hierdurch kam es zum Einbau von größeren Nickelpartikeln in die Schicht, was die Rauigkeit der Oberfläche stark erhöhte. Weitere negative Einflüsse der Partikeleinschlüsse in der Beschichtung waren nicht zu erwarten, sodass auf eine erneute Beschichtung verzichtet wurde.

Die Proben wurden insgesamt drei Stunden beschichtet, was bei einer durchschnittlichen Abscheiderate von $20\mu\text{m}$ pro Stunde (bei neu angesetztem Bad) zu einer Schichtdicke von etwa $60\mu\text{m}$ führt. Der Phosphorgehalt der Schicht liegt laut DURNI-COAT-Datenblatt bei 7-9%. Die Vickershärte dieser Schichten liegt im abgeschiedenen Zustand bei ca. 550 HV. Nach erfolgter Beschichtung wurden die Proben in der Hochschule wärmebehandelt, um eine Steigerung der Härte zu erreichen. Dafür wurden die Proben für eine Stunde bei 400°C getempert. Für die Proben wurde eine Härtesteigerung auf ca. 1100HV erwartet. Eine Messung der tatsächlich erreichten Härte wurde nicht durchgeführt, um die Proben nicht vor dem Anhaftungsversuch zu beschädigen.

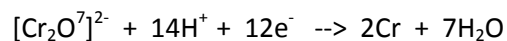


Abbildung 10 Nickelelektrolyt mit zwei Probezylindern

3.3 Hartchromschichten

3.3.1 Galvanische Herstellung

Chromschichten werden galvanisch, das heißt mit Hilfe einer äußeren Stromquelle, abgeschieden. Dafür wird das Substrat kathodisch geschaltet. Abbildung 11 zeigt schematisch das Prinzip der Chromabscheidung. Bei Kontakt zwischen Bauteil und Elektrolyt, zum Beispiel durch das Eintauchen des Bauteils in die Elektrolytlösung, wandern die positiven Metallkomplex-Ionen zur Kathode. Dort werden die Metallionen reduziert und bilden eine feste Metallschicht auf dem Substrat. Nach Gaida und Aßmann [25], lassen sich die Vorgänge an der Kathode für Chromschichten mit folgender Formel zusammenfassen:



Da das Abscheidungspotenzial des Chroms nahezu mit dem Abscheidungspotenzial des Wasserstoffs zusammenfällt, bildet sich an der Kathode parallel zur Schichtbildungsreaktion immer auch Wasserstoff. Dadurch geht mehr als die Hälfte der aufgewendeten Energie für die Bildung von Wasserstoff verloren, was den Wirkungsgrad beim Abscheiden von Chromschichten deutlich senkt. Für das Abscheiden von Chromschichten werden unlösliche Anoden (meist Graphit mit Titanklemmen [27]) verwendet, sodass sich alle Chromionen bereits im Elektrolyten befinden und gegebenenfalls nachdosiert werden müssen. An der Anode findet die Oxidation von Wasser zu molekularem Sauerstoff nach folgender Formel statt:

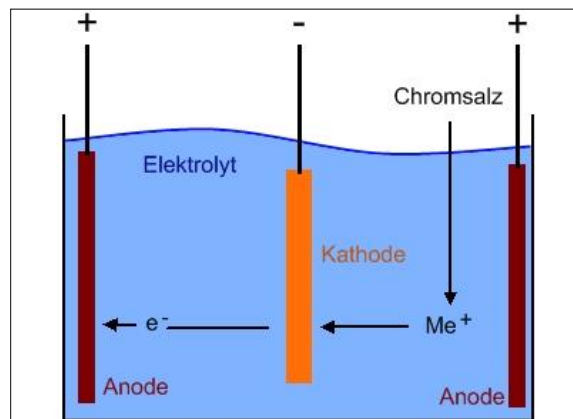
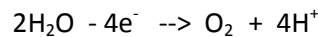


Abbildung 11 Prinzip der galvanischen Chromabscheidung [26]

Aufgrund der kanzerogenen Wirkung von Chrom(VI)-Verbindungen gibt es aktuell verschiedene Versuche, technische Chromschichten von mehr als 2 µm mit dem unbedenklichen Chrom(III)-Verbindungen abzuscheiden. Bisher ist es lediglich gelungen, dünne Glanzchromniederschläge mit Chrom(III)-Elektrolyten zu erzeugen. Für Hartchromüberzüge existiert aktuell kein Patent, das eine Abscheidung mit Chrom(III)-Verbindungen erlaubt. [27]

3.3.2 Eigenschaften und Verwendung von Chromschichten

Chrom wird für die Beschichtung von tribologisch stark beanspruchten Bauteilen im Maschinen- und Anlagenbau verwendet. Nach Angaben der BBS Schalungsbau GmbH wurden bereits Untersuchungen über eine Eignung von Hartchromschichten als Antihafschicht im Betonbau durchgeführt. Allerdings konnten keine genauen Ergebnisse ermittelt werden. Deshalb sollen Hartchromschichten im Rahmen dieser Arbeit erneut näher auf ihre Eignung untersucht werden.

Mit einem Potenzial von $-0,71\text{V}$ gegen die Normalwasserstoffelektrode ist Chrom ein vergleichsweise unedles Metall. Durch oxidative Einwirkungen werden Chromschichten allerdings schnell passiviert, sodass dünne Glanzchromschichten einen guten Korrosionsschutz und eine sehr gute Anlauf- und Witterungsbeständigkeit aufweisen. Durch die dichte Rissigkeit bieten dicke Chromüberzüge allerdings nur einen unzureichenden Korrosionsschutz, sofern die Risse in der Chromschicht bis auf den Grundwerkstoff reichen. Um einen ausreichenden Korrosionsschutz zu gewährleisten, werden solche Schichten meist unternickelt. Mit Hartchromelektrolyten können enorm harte Schichten von über 1000HV abgeschieden werden, welche eine überdurchschnittliche Verschleißbeständigkeit aufweisen. Zusätzlich besitzen Chromüberzüge ein gutes Reibverhalten mit einem geringen Reibungskoeffizienten gegenüber Stahl. Daher eignen sich Hartchromüberzüge für die Beschichtung von Kolbenstangen in hydraulischen Anlagen oder als Verschleißschutz für Umformwerkzeuge.[28] Aufgrund der schlechten Benetzbarkeit von Chrom werden wässrige Medien von der Oberfläche abgewiesen[29]. Daher könnten Chromschichten für die Herstellung von Anti-Betonanhaftungs-Schichten geeignet sein.

3.3.3 Auftrag der Hartchromschicht

Nach dem Schleifen der Proben auf einen R_z -Wert kleiner $3\mu\text{m}$, wurden die Proben nach Hartha zur Firma MBW Metallveredlung versendet und dort mit einer Hartchromschicht versehen. Als Hartchrom werden Chromschichten von mehr als $3\mu\text{m}$ Schichtdicke bezeichnet. Die Bezeichnung ist dabei etwas unglücklich formuliert, da Hartchromschichten in etwa dieselbe Vickershärte wie dünne Glanzchromschichten aufweisen. Der Name kommt eher von der Verwendung der Überzüge als Verschleißschuttschicht. Die Einhaltung der geringen Rauheitsvorgaben war vor allem für die Hartverchromung wichtig, da sonst eine erhöhte Gefahr der Knospen- und Warzenbildung während der Schichtabscheidung bestanden hätte[18]. Die Vorbehandlung, Beschichtung und das zusätzliche Schleifen wurden im MBW-Werk durchgeführt. Das nachträgliche Schleifen der Probekörper war nötig, um nach dem Aufbau der rauen Chromschicht eine möglichst glatte Oberfläche mit günstigem Reibungskoeffizienten zu erhalten. Insgesamt wurde eine ca. $100\mu\text{m}$ starke Hartchromschicht aufgetragen.

3.4 Gleitlacke

Gleitlacke gewinnen in der modernen Industrie zunehmend an Bedeutung. Häufig kann durch das Aufbringen von Trockenschmierfilmen auf konventionelle Schmierungen durch Öle und Fette verzichtet werden. Außerdem erlauben solche Schmierfilme häufig eine vereinfachte Konstruktion, weil eine Nassschmierung nicht mehr notwendig ist. [30;31]

In ihrer Zusammensetzung ähneln Gleitlacke den Industrielacken. Es handelt sich um Dispersionen von modifizierten Festschmierstoffen, die in einer Formulierung aus Löse- und Bindemittel vorliegen. Anstelle von Farbpigmenten werden Trockenschmierstoffe wie PTFE oder Molybdänsulfid in die Lackschicht eingebaut. Zusätzlich können verschiedene Additive für den Korrosionsschutz oder eine verbesserte Benetzung im Lack enthalten sein. Genauere Angaben zur Lackformulierung und den verwendeten Inhaltstoffen unterliegen der Geheimhaltung und werden von den Herstellern nicht preisgegeben. Nach dem Verdunsten des Lösemittels und dem Aushärten des Bindemittels, bilden Gleitlacke einen gut haftenden, trockenen Schmierfilm auf der beschichteten Oberfläche. Die Schichtdicken liegen üblicherweise zwischen 10µm und 30µm. Entscheidend für den Halt der Gleitlackschicht auf dem Substrat ist der Vorbehandlungszustand der Oberfläche. Diese sollte frei von Fetten, Ölen und Wachsen sein. Das Sandstrahlen der Oberfläche oder eine vorherige Phosphatierung können die Haftung der Lackschicht auf der Substratoberfläche zusätzlich verbessern.

Abbildung 12 zeigt die Wirkungsweise des Gleitlacks. Durch einen partiellen Auftrag schmierwirksamer Komponenten aus der Gleitlackschicht kommt es zur Ausbildung eines sogenannten "Transferfilmes". Teile des Festschmierstoffes werden durch die Reibung am Gegenkörper aus der Lackschicht gerissen und bilden dort einen anhaftenden Schmierfilm. Durch den Aufbau dieser Schicht können die Reibwerte zwischen den Gleitkörpern stark reduziert werden. [32]

Für den Versuch wurden zwei Proben mit dem PTFE-Lack "GLEITMO 980" der Firma Fuchs-Lubritech beschichtet. Der Lack wurde mit Hilfe einer Sprühdose auf die Probezylinder aufgetragen. Die Aushärtzeit beträgt laut Herstellerangaben ca. eine Stunde bei Raumtemperatur. Die Lackschicht wurde zwei Tage vor dem ersten Versuch aufgesprüht.

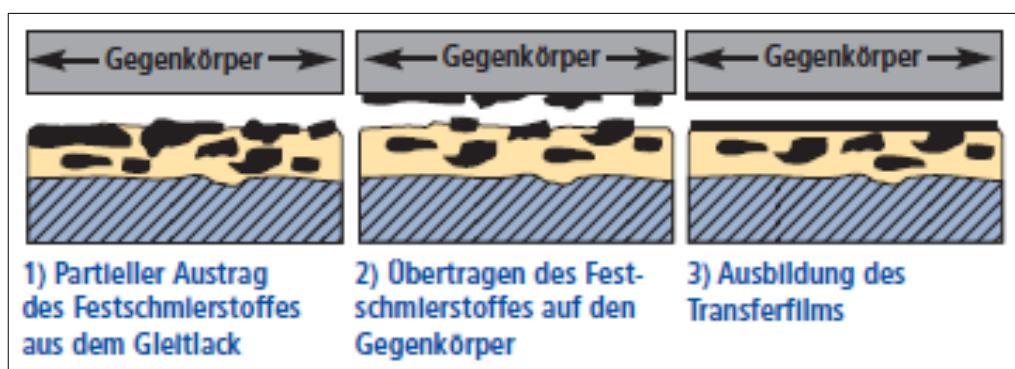


Abbildung 12 Wirkungsweise eines Gleitlacks

3.5 Diamantähnliche Kohlenstoffschichten - DLC

3.5.1 Herstellung

DLC steht für diamond-like-carbon, also diamantähnliche Kohlenstoffschichten. Der Auftrag solcher Schichten erfolgt im PECVD-Verfahren. Die Beschichtung der untersuchten Probezylinder wurde von der CeWoTeC GmbH in Chemnitz durchgeführt.

PECVD steht für plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung und stellt einen Spezialfall der CVD-Verfahren dar. Bei der chemischen Gasphasenabscheidung reagieren gasförmige Reaktanten, sogenannte "Precursor", an der erhitzten Substratoberfläche zu einem Feststoff und bilden eine anhaftende Schicht. Das Beschichtungsmaterial ist dabei Bestandteil der gasförmigen Precursor. Um die Reaktion an der Oberfläche zu unterstützen und die Bildung von Feinstpulvern zu vermeiden, wird der Druck in der Reaktionskammer meist auf Werte zwischen 1-1000Pa gesenkt [33]. Beim PECVD-Verfahren wird der Abscheidungsprozess durch ein Plasma unterstützt. Abbildung 13 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer solchen Anlage. Für die verwendeten Probekörper wurde ein Hochspannungsplasma aus einem Methan-Acetylgemisch genutzt. Die im Plasma befindlichen Elektronen werden bei dem Prozess so stark beschleunigt, dass eine zusätzliche Aufheizung des Substrates nicht erforderlich ist. Im Fall der genutzten Anlage wurde der Substrathalter sogar gekühlt, um das Substrat vor zu starker thermischer Belastung zu schützen. Die Verwendung von Methan und Acetylen als Precursor führt zu wasserstoffhaltigen a-C:H Schichten. Prinzipiell ist eine Abscheidung auf jedem Material möglich, solange die thermische Belastung nicht zu Verzug oder Zersetzung des Grundmaterials führt. Die zu beschichtende Oberfläche sollte eine möglichst geringe Rauigkeit aufweisen, da die Kohlenstoffschichten üblicherweise nicht dicker als 2µm sind. [35]

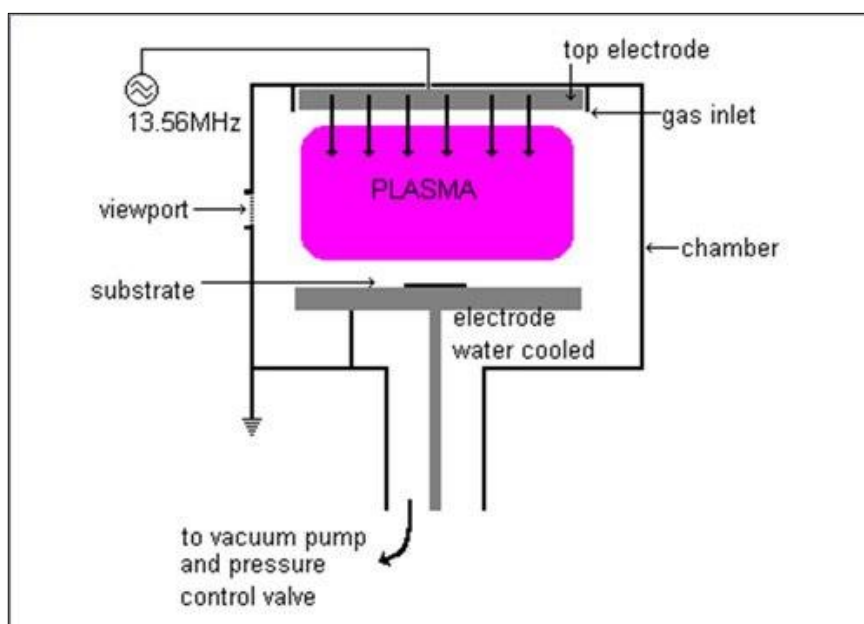


Abbildung 13 Prinzip der plasmaunterstützten chemischen Gasphasenabscheidung [34]

3.5.2 Eigenschaften und Verwendung von Kohlenstoffschichten

Bei den DLC-Schichten handelt es sich um sehr dünne Kohlenstoffschichten. Für den Versuch wurden zwei Probekörper im PECVD-Verfahren beschichtet. Neben dem Schleifen der Proben erfolgte keine weitere Vorbehandlung der zylindrischen Proben. Gewöhnlich wird vor einer Hartstoffbeschichtung eine Wärmebehandlung des Grundmaterials durchgeführt, um die Härte des Trägermaterials zu steigern und so dem sogenannten Eierschaleneffekt entgegenzuwirken. Die diamantähnlichen Kohlenstoffschichten sind nur wenige Mikrometer dünn. Daher ist die Haltbarkeit der Schicht stark abhängig von der Härte des Substrates, wenngleich die Schicht enorm hart ist. Bei den verwendeten Proben handelt es sich um relativ weichen Rundstahl mit einer Härte von ca. 130HV [36]. Bei punktueller Belastung gibt das weiche Grundmaterial nach und kann die Hartstoffschicht nicht ausreichend stützen. Die harte Kohlenstoffschicht verfügt wegen der hohen Härte nicht über dieselbe Verformbarkeit wie das Grundmaterial und bricht an der Belastungsstelle. So können tiefe Kratzer und Abplatzungen entstehen. [37]

Um die Vergleichbarkeit der Proben vor den jeweiligen Beschichtungen zu wahren und den Versuchsaufwand gering zu halten, wurde auf eine Härtung der Probezylinder vor der DLC-Beschichtung verzichtet.

Durch die Kohlenstoffbeschichtung mittels PECVD-Verfahren entsteht eine amorphe, diamant- und graphitähnliche Schicht, die sich durch ausgezeichnetes tribologisches Verhalten auszeichnet. Die Schichten sind sehr hart (über 2000HV) und mindern die Reibung für verschiedene Applikationen [38]. Neben den bereits genannten a-C:H-Schichten werden in der Industrie häufig metallhaltige Me-DLC-Schichten verwendet. Durch gezielte Modifizierung der Kohlenstoffschichten mit nichtmetallischen Elementen (a-C:H:X) lassen sich Oberflächenenergien in der Größenordnung von Teflonschichten erreichen. DLC-Schichten werden bereits erfolgreich für die Beschichtung von Nockenwellen und Kolbenringen im Motorenbau eingesetzt. Außerdem verwendet man diese Schichten zur Verschleißminderung von Extrusions-, Tiefzieh- und Schneidwerkzeugen. Die antiadhäsiven Eigenschaften, die durch den Einbau von Fluor oder Silizium in die Kohlenstoffmatrix verstärkt werden können, lassen die Anwendung von DLC-Schichten auf den Oberflächen von Spritzgusswerkzeugen oder bei der Herstellung von Kunststoffschäumen zu [39].

Überall wo adhäsiver Verschleiß auftritt, bieten DLC-Schichten häufig die Lösung der Anhaftungsproblematik. Aufgrund hoher Härte, geringer Reibwerte und der antiadhäsiven Oberfläche könnten DLC-Schichten eine Möglichkeit zur Beschichtung von kritischen Teilen an Baumaschinen gegen die Betonanhaftung sein.

3.6 Korrosionsschutzwachs

Wachse sind langkettige Kohlenwasserstoffverbindungen, die durch ihre mechanisch physikalischen Eigenschaften wie folgt definiert werden können.

"Ein Stoff wird als Wachs bezeichnet, wenn er bei 20°C knetbar, fest bis brüchig hart ist, eine grobe bis feinkristalline Struktur aufweist, farblich durchscheinend bis opak, aber nicht glasartig ist, über 40 °C ohne Zersetzung schmilzt, wenig oberhalb des Schmelzpunktes leicht flüssig (wenig viskos) ist, eine stark temperaturabhängige Konsistenz und Löslichkeit aufweist sowie unter leichtem Druck polierbar ist." [40]

Eine Schlüsselrolle für industrielle Anwendungen spielen vor allem aus Erdöl synthetisierte Wachse auf der Grundlage von Paraffin. Neben der Verwendung als Kerzenwachs, sind viele Wachse in Polituren und ähnlichem enthalten. Der Wachsfilm soll die Oberfläche versiegeln und vor Wasser und Schmutz schützen.

Die Firma Mark-Schmierstoffe empfahl die Verwendung von "Bechem-Korrosionsschutzwachs" als mögliche Alternative zum Einsatz von öligen Trennmitteln. Das Unternehmen versicherte gute Erfahrungen mit dem Korrosionsschutzwachs gemacht zu haben. Besonders bei starken Abrasionserscheinungen durch den Beton, seien mit dem Wachs bessere Trennerfolge als mit dem eingesetzten Trennmittel erzielt worden. Neben den Wachskomponenten enthält das Wachsspray verschiedene Korrosionsschutzadditive. Genauere Informationen zur Wachsformulierung konnten aus Geheimhaltungsgründen nicht vom Hersteller herausgegeben werden.

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Proben mit dem Bechem-Multiprotect-Korrosionsschutzwachs beschichtet. Das Aufsprühen der Wachsschicht wird in Abbildung 14 dargestellt. Die Beschichtung wurde ca. eine Woche vor der ersten Versuchsdurchführung aufgebracht.



Abbildung 14 Beschichtung mit Bechem-Korrosionsschutzwachs

3.7 Emailsichten

Emailschichten sind glasartige, anorganische Überzüge, die sich hauptsächlich aus Silicaten und Oxiden zusammensetzen. Zur Herstellung der Schichten werden zunächst Emailrohlinge (sogenannte Fritten) hergestellt. Diese bestehen aus einer schmelzflüssigen Mischung von Quarz, Borax, Feldspat, Soda, Haftoxiden und Flussmittel. Nach dem Abschrecken werden die Fritten unter Beimischung von Wasser zu spritzfähigem Schlicker vermahlen. Im Anschluss erfolgt das Aufbringen der ersten Schlickerschicht und der Brennprozess bei ca. 900°C. Da technische Emailsichten bis zu 2mm Dicke aufgetragen werden, erfolgt der Schichtauftrag in mehreren Schritten. Man unterscheidet dabei zwischen dem Grundemail, das die Haftung zum Grundwerkstoff herstellen soll, und dem Deckemail, welches für eine hohe chemische Beständigkeit der Schicht sorgt und vollständig mit der Grundschicht verschmilzt.

Emailschichten zeichnen sich durch eine sehr gute Haftung zum Grundwerkstoff aus. Beim Brennprozess kommt es zur Bildung eines Verbundes zwischen Grundmaterial und Schichtwerkstoff (siehe Abbildung 15). Durch Diffusionsprozesse werden oberflächennahe Elemente aus dem Grundwerkstoff in die Emailmatrix eingebaut, sodass die daraus folgende Aufrauung der Oberfläche gute Bedingungen für die mikromechanisch Verankerung der Schicht schafft. Zusätzlich sorgen sowohl Valenzbindung, als auch Van-der-Waals-Kräfte für eine sehr gute Haftung der Emailschicht auf den Bauteilen.

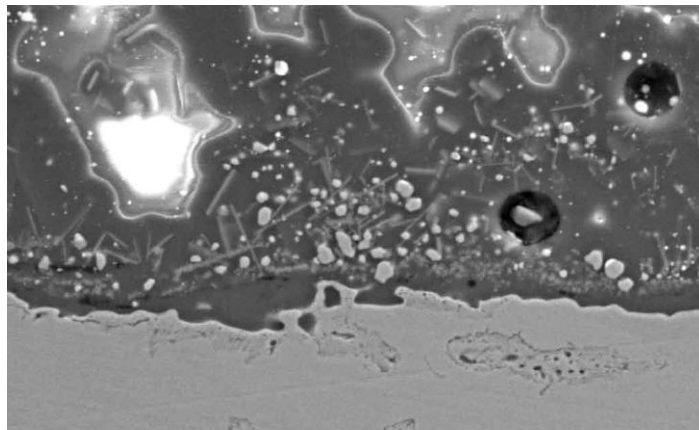


Abbildung 15 Verbundzone zwischen Grundmaterial und Email [39]

Beim Beschichten von Stahlbauteilen müssen allerdings bestimmte Parameter bei der Stahlauswahl berücksichtigt werden. So muss der Kohlenstoff- und Schwefelanteil im Stahl begrenzt werden. Selbiges gilt für fast alle metallischen Begleitelemente. Um Fehlstellen bei der Emaillierung zu vermeiden, sollte also ein sauberes, ferritisches Gefüge in der Randschicht vorliegen. Vor der Beschichtung wird die Substratoberfläche meist durch ein abrasives Strahlgut gereinigt und aufgeraut.

Neben der guten Bindung zum Grundwerkstoff zeigen Emailüberzüge sehr gute chemische Beständigkeiten bei hohen Prozesstemperaturen. Deshalb werden solche Beschichtungen vor allem im chemischen Apparate- und Anlagenbau eingesetzt. Die glatten Oberflächen ($R_a < 0,05$) ermöglichen eine einfache Reinigung von Behältern und Anlagen. Zusätzlich zeigen die glasartigen Schichten keine Adhäsionsneigung. Weiterhin gelten Emailsichten als verschleißfest gegen abrasive Beanspruchungen und weisen eine Härte von ca. 600HV auf. [41]

Daher sollten Emailsichten näher auf ihre Eignung als Beschichtung gegen die Anhaftung von Beton untersucht werden.

3.8 Kunststoffsichten aus PTFE , PFA und FEP

Die Kunststoffe PTFE (Polytetrafluorethylen), PFA (Polyfluoralkoxy) und FEP (Fluorethylenpropylen) sind perfluorierte Kohlenwasserstoffe, die in der Oberflächentechnik zur Erzeugung von ultrahydrophoben und antiadhäsiven Oberflächen eingesetzt werden. PTFE ist weltweit unter dem Markennamen "Teflon" bekannt, und wird durch radikalische Polymerisation von Tetrafluorethen (TFE) erzeugt. Man unterscheidet dabei zwischen Emulsions-PTFE und Suspensions-PTFE.

Die Herstellung von Kunststoffüberzügen aus PTFE wird in einem Sinterprozess realisiert. Dafür muss die Oberfläche (üblicherweise durch Sandstrahlen) aufgeraut werden, um eine gute Haftung der Teflonsichten auf dem Substrat zu ermöglichen. Danach wird der Kunststoff als Pulver oder Paste auf das Werkstück aufgetragen. Anschließend erfolgt das Sintern. Bei Temperaturen von ca. 380°C entsteht eine homogene, amorphe Schicht, die während des Abkühlprozesses zurück in einen teilkristallinen Zustand übergeht. Während des Sinterns erfolgt eine mechanische Verankerung der Fluorpolymere mit den Poren im Werkstück, sodass eine gute Haftung der Schicht auf dem Werkstück erreicht werden kann. Zur Verbesserung der Haftung zwischen Polymerschicht und Werkstück werden Primer eingesetzt. Abbildung 16 verdeutlicht die mechanische Verankerung der Kunststoffsicht durch den Einsatz von Primern. [42]

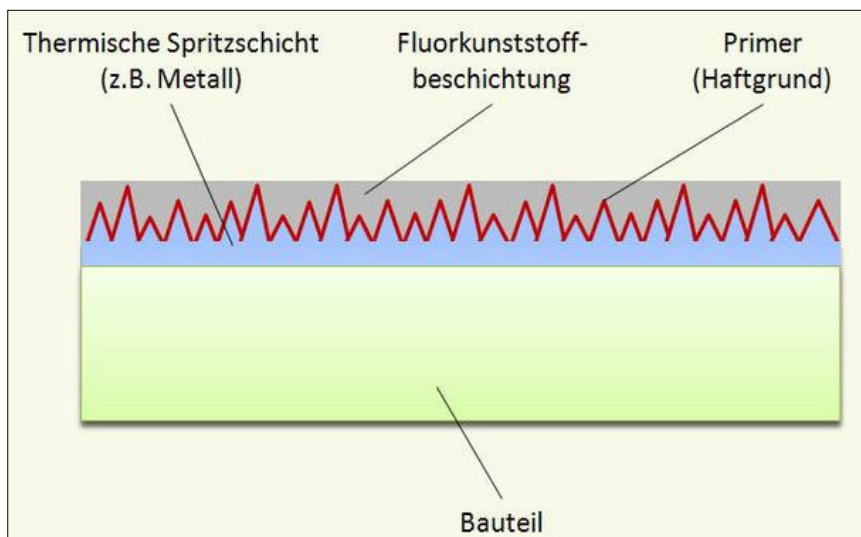


Abbildung 16 Verbesserte Verankerung durch Primer [43]

Die oben genannten Fluorpolymere sind kaum benetzbar und zeigen stark antiadhäsive Eigenschaften. Zusätzlich führen Teflonschichten zu enorm niedrigen Reibungskoeffizienten. Aufgrund der starken Bindungen zwischen den Kohlenstoffatomen, bzw. zwischen Kohlenstoff- und Fluoratom, zeigt die Schicht eine nahezu universelle Chemikalienbeständigkeit. Nachteilig wirkt sich die geringe Härte der Kunststoffschicht aus, aus der sich ein geringer Widerstand gegen abrasiven Verschleiß ableitet. Durch die Einlagerung verschiedenster Compounds und eine weitere Modifizierung von PTFE und seinen Co-Polymeren können allerdings auch diese Eigenschaften verbessert werden, wenngleich Verschleißwiderstände in der Größenordnung der Metallschichten nicht erreicht werden können. [42]

Die untersuchten Probebeschichtungen wurden von der Firma Rhenotherm in Kempen beschichtet. Das Unternehmen bietet unterschiedliche Antihafbeschichtungen an, die jeweils aus verschiedenen Mischungen der genannten Polymere und Zusatzstoffen aufgebaut sind. Für die Untersuchung wurde das Schichtsystem Rhenolease MK V ausgewählt, da diese Beschichtung neben exzellenten Antihafteffekten laut Hersteller auch besonders hart und abriebfest sein soll. Anwendung finden solche Antihafschichten bereits in der Lackierindustrie, wo Vorrichtungen, Rohre und Behälter beschichtet werden, um die Benetzbarkeit der Oberflächen zu reduzieren und so Lackablagerungen zu verhindern [44].

Die beschriebenen Eigenschaften machen Kunststoffschichten aus PTFE, PFA und FEP zu einer interessanten Alternative zur Beschichtung von anhaftungsgefährdeten Flächen, bei denen keine erhöhten Belastungen durch abrasiven Verschleiß zu erwarten sind. Möglicherweise könnte der Reinigungsaufwand für Geräte und Anlagen auch in der betonverarbeitenden Industrie verringert werden.

4 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

4.1 Referenzwertbestimmung

Zur Bestimmung von Vergleichswerten wurden die Drucktrennkkräfte von je einem unbehandelten und einem trennmittelbenetzten Probezylinder aufgezeichnet. Da die nachfolgenden Versuche sich nicht nur in der Wahl der Beschichtung, sondern auch in der Aushärtungszeit des Betons unterscheiden, wurden Referenzwerte für 48 und 72 Stunden Aushärtungszeit ermittelt. Die Messwerte für den unbehandelten Stahl sollten Aufschluss darüber geben, ob die Beschichtungen der Proben überhaupt eine Verminderung der Haftkräfte zwischen Probenoberfläche und Betonmantel bewirken, oder ob eine Verschlechterung der Anhaftungseigenschaften festgestellt wird. Die mit dem Trennmittel Divinol Multiform B Classic (Datenblatt siehe [45]) benetzten Proben sollten einen Referenzwert für sehr gute Antihafteigenschaften darstellen. Damit eine Beschichtung als geeignet angesehen wird, sollte die Druckkraft zur Trennung (nachfolgend Grenzkraft) den verdoppelten Referenzwert für die trennmittelbenetzten Proben nicht überschreiten.

Falls Nachfolgeuntersuchungen zu dieser Arbeit mit geändertem Versuchsaufbau oder anderen geometrischen Abmaßen für die Proben durchgeführt werden sollten, wird aus den Messwerten die Trennspannung ermittelt, damit die Versuche vergleichbar bleiben. Die Spannung berechnet sich allgemein aus dem Verhältnis von Kraft und Fläche. Um die Trennspannung zu berechnen wird die Maximalkraft bei der Trennung ins Verhältnis zur Anhaftungsfläche gesetzt:

$$\sigma_{\text{Trenn}} = F_{\text{max}} / A_{\text{Haft}}$$

Die Anhaftungsfläche entspricht dabei der mit Beton behafteten Mantelfläche der Proben, die bei allen Versuchen als gleich angenommen wird, da geringe Unterschiede keinen entscheidenden Einfluss auf das Messergebnis nehmen.

$$A_{\text{Haft}} = \pi * d_{\text{Probe}} * h_{\text{Betonmantel}} = \pi * 40\text{mm} * 50\text{mm} \approx 6283,18\text{mm}^2$$

Tabelle 4 gibt eine kurze Übersicht über die Ergebnisse aller vier Versuche zur Referenzwertbestimmung. Bei den trennmittelbehandelten Proben wurden die errechneten Grenzwerte für Maximalkraft und Spannung mit angegeben. Auffällig ist der Anstieg der Maximalkraft mit steigender Aushärtungszeit.

Probenbezeichnung	Maximalkraft bei der Trennung (in N)	Trennspannung (in N/mm ²)	Grenzkraft (in N) und Grenzspannung (in N/mm ²)
unbehandelter Stahl 48h	3865	0,615	-
unbehandelter Stahl 72h	4421	0,703	-
Trennmittelfilm 48h	223	0,0355	446 0,071
Trennmittelfilm 72h	329	0,0536	658 0,1072

Tabelle 4 Zusammenfassung der Referenz- und Grenzkräfte

Neben der Ermittlung von Vergleichswerten für die Auswertung der nachfolgenden Versuche, sollte diese Messreihe auch Aufschluss über die grundsätzliche Eignung des Versuchsaufbaus geben. Im Vorfeld der Messung wurde vermutet, dass die Probezylinder durch die Schwindung des Betonmantels eingepresst werden könnten, sodass neben der Haftkraft vor allem die Einspannkraft durch den Betonmantel gemessen würde. Im Versuch mit den trennmittelbenetzten Probezylindern zeigte sich jedoch, dass dies nicht der Fall war. Während der Entwicklung des Versuchsaufbaus im Praktikum, wurde ein Vorversuch durchgeführt. Dabei konnte bei den mit Trennmittel benetzten Stahlflächen nur eine sehr geringe Trennkraft gemessen werden[17]. Da dies auch für die zylinderförmigen Proben mit einem Trennmittelfilm festgestellt werden konnte, hat die Schwindung der Betonummantelung offenbar keinen nennenswerten Einfluss auf das Messergebnis.

Abbildung 17 zeigt die Kraft-Weg-Diagramme für den Drucktrennversuch von unbehandelten Stahlproben für zwei unterschiedliche Aushärtungszeiten. Der Kurvenverlauf zeigt deutlich, dass zunächst eine große Trennkraft aufgebracht werden muss, bevor der Probezylinder durch den Betonmantel gedrückt werden kann. Die nach dem Überwinden der Haftkraft benötigte Druckkraft wird durch die starke Reibung zwischen Beton und Stahloberfläche verursacht. Je weiter der Zylinder aus dem Beton gedrückt wird, desto geringer wird die wirksame Reibfläche zwischen Beton und Stahl. Dadurch sinkt auch die nötige Kraft bis zum Ende der Messstrecke weiter ab. Der Kurvenverlauf ist typisch und wiederholt sich bei den meisten Probebeschichtungen der nachfolgenden Messreihen.

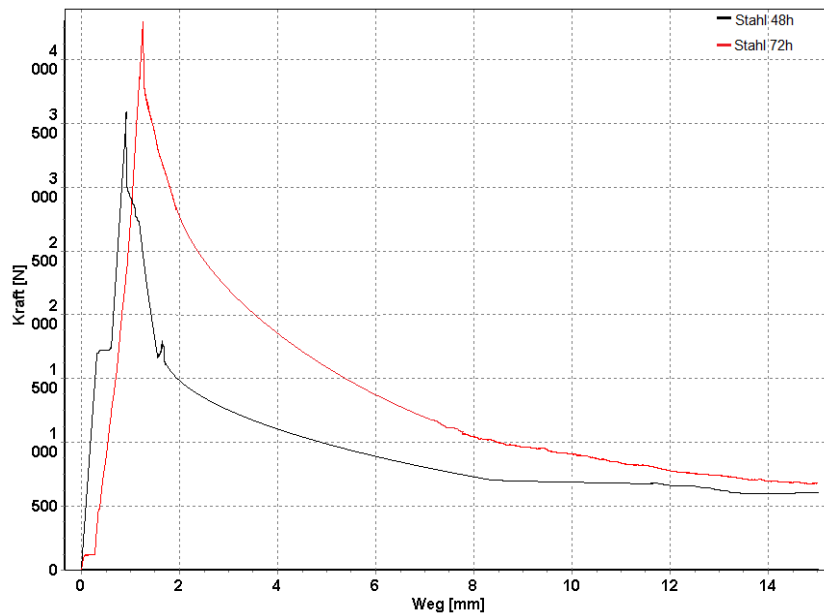


Abbildung 17 Referenzkurven von unbehandeltem Stahl

4.2 Versuch I - Aushärtungszeit 48 Stunden

Vor Versuch I konnte der Betonmantel zwei Tage aushärten. Während der Durchführung des ersten Versuchs kam es zu einigen Problemen, die im folgenden Abschnitt erläutert werden sollen. Aufgrund dieser Probleme mussten verschiedene Parameter nachträglich für die Folgeversuche angepasst werden.

Trotz des Einsatzes von Trennmittel ließ sich ein großer Teil der Betonformen nicht mehr von der Ummantelung lösen. Grund dafür war wahrscheinlich eine unzureichende Benetzung der Betonformen durch einen zu dicken Auftrag mit dem Pinsel. Dadurch wurden Teile der Formeninnenfläche beim Verdichten wieder von Trennmittel befreit, sodass es zu lokalen Anhaftungen kommen konnte, die ein späteres Entfernen der Stahlformen verhinderten. Durch den Verbleib der äußeren Formen am Beton, konnten im Versuch I lediglich Tendenzen festgestellt werden. Die genauen Zahlenwerte hingegen sind häufig etwas zu niedrig, da nicht die Probezylinder im Betonmantel bewegt wurden, sondern durch Aufbringen der Druckkraft F_D der Betonmantel durch die äußere Form gedrückt wurde. Häufig kam es durch Trennmittelreste an den Formeninnenflächen, welche die tatsächliche Anhaftungsfläche reduzierten, zu nachträglichen Trennungen zwischen Stahlform und Betonmantel, wodurch die Ummantelung ca. einen Zentimeter bis zur Auflage rutschen konnte. Der Vorgang ist in Abbildung 18 dargestellt. Um diese Problematik zu umgehen, wurden die Formen bei allen folgenden Versuchen trotz Trennmittelbehandlung nach ca. 12 Stunden entfernt.

Die Messstrecke sollte zunächst 20mm betragen. Das erwies sich allerdings als unnötig, da die Maximalkräfte bei allen Proben im ersten Drittel der Gesamtstrecke registriert wurden. Daher wurde die Messstrecke auf 15mm reduziert.

Weiterhin wurde während des Versuches festgestellt, dass nicht alle Maschinenparameter optimal gewählt waren. Bei einem Kraftabfall von mehr als 50% wurde der Messvorgang abgebrochen, sodass die Druckkraft nicht über die gesamte Messstrecke von 15mm aufgenommen werden konnte. Da der Kraftabfall häufig durch das Rutschen des Betons in der Form verursacht wurde, verstärkte diese Maschineneinstellung die negativen Auswirkungen des Verrutschens auf das Kurvenbild. Für die nachfolgenden Versuche wurde die Messstrecke auf 15mm festgelegt, ohne den Kraftabfall während der Messung zu berücksichtigen.

Abbildung 19 zeigt das aufgenommene Kraft-Weg-Diagramm beim Drucktrennversuch der Hartchromschicht. Hier werden die beschriebenen Probleme gut veranschaulicht. Zunächst baut sich keine hohe Druckkraft auf, da der Beton in der Stahlform herunter rutscht. Erst nachdem der Beton auf der Mantelauflage aufliegt, baut sich die Trennkraft auf. Die maximale Kraft für die Überwindung der Anhaftungskräfte beträgt über 3000N. Nach dem Losbrechen der Anhaftung fällt die Kraft stark ab, sodass die Maschine den Messvorgang abbricht.

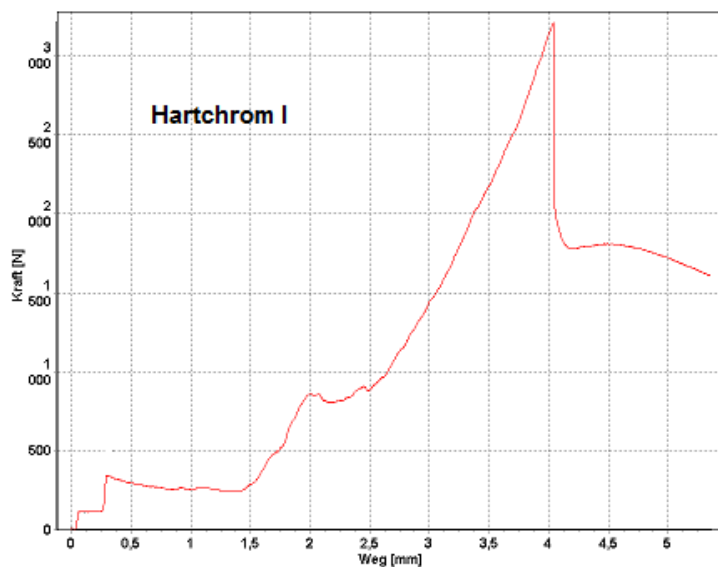


Abbildung 19 Unvollständiges Kraft-Weg-Diagramm bei der Messung der Hartchromschicht



Abbildung 18 Betonmantel rutscht in der Stahlform

verwendete Beschichtung	Maximalkraft (in N) und Maximalspannung (in N/mm ²) während der Trennung	Zustand der Beschichtung nach der Trennung	Weitere Untersuchung in nachfolgenden Versuchen
getempert	4837	keine sichtbare Beschädigung	Ja
Nickelphosphor	0,769		
Nickelphosphor mit PTFE-Einlagerungen	2886 0,459	keine sichtbare Beschädigung	Ja
Kohlenstoffschicht DLC	5003 0,796	Kratzer bis auf Grundmaterial; Korrosion (Anhang VII)	Nein
Hartchrom	4782 0,761	keine sichtbare Beschädigung	Ja
Gleitlack mit PTFE	6598 1,0501	keine sichtbare Beschädigung; (Verfärbung der Betonfläche)	Ja (poliert)
Korrosionsschutzwachs	1538 0,245	fast vollständig entschichtet	Ja (poliert)
Emaile	975 0,155	keine sichtbare Beschädigung	Ja
Kunststoff aus PTFE/PFA/FEP	170 0,027	geringe Kratzer	Ja

Tabelle 5 Versuchsergebnisse von Versuch I

Trotz der genannten Probleme, die während Versuch I auftraten, können Tendenzen bezüglich der Eignung der Schichten aufgezeigt werden. Tabelle 5 fasst die Versuchsergebnisse des ersten Versuchs zusammen. Alle Kraft-Weg-Diagramme zu Versuch I befinden sich im Anhang dieser Arbeit (siehe Anhang IX).

Die relativ hohen Maximalkräfte bzw. Trennspannungen, die bei den Metallschichten festgestellt wurden, sprechen gegen ihre Eignung als Beschichtung gegen die Anhaftung von Beton. Trotzdem sollen die vorhandenen Schichten in den nachfolgenden Versuchen weiter betrachtet werden, um die Einflüsse von verlängerter Aushärungszeit und dem Luftporenbildner als mögliches Betonzusatzmittel zu charakterisieren. Durch die hohe Verschleißfestigkeit wurden nach dem Versuch auf keiner Metallschicht Kratzer oder großflächige Abtragungen der Schicht sichtbar. Hartchromschichten könnten also lediglich den Verschleiß von abrasiv beanspruchten Flächen

mindern. Getemperte Nickelschichten würden neben dem Verschleißschutz auch einen gewissen Korrosionsschutz liefern. Eine Nutzung als Antihafschicht scheint bei beiden Beschichtungen nicht möglich.

Verglichen mit den übrigen Metallschichten, zeigt die Einlagerung von PTFE-Partikeln in der Nickeldispersionsschicht einen positiven Effekt auf die benötigte Trennkraft. Diese kann um ca. 40% reduziert werden. Allerdings ist die gemessene Trennkraft von 2886N trotzdem deutlich zu groß, als dass eine Beschichtung von Bauteilen für einen Praxistest sinnvoll erscheint.

Neben den bereits genannten Auffälligkeiten, sollte der Oberflächenzustand der DLC-Schicht näher beschrieben werden. Trotz der großen Härte der Schichten, die vom Hersteller wiederholt bestätigt wurde, entstanden schon beim Verdichten des Betonmantels erste, tiefe Kratzer in der Beschichtung. Nach der Trennung wurden weitere Kratzer und Flächenteile ohne Kohlenstoffschicht sichtbar (siehe Bilder Anhang VII). Der Grund hierfür liegt im sogenannten Eierschaleneffekt (siehe dazu Kapitel 3.5.2. "Eigenschaften und Verwendung von Kohlenstoffschichten"). Ohne eine vorherige Härtung des Grundmaterials, sind auch die DLC-Schichten folglich nicht als Antihafschicht geeignet. Die relativ hohen Trennkräfte sprachen jedoch gegen eine erneute Beschichtung der Proben. In den nachfolgenden Versuchen wurden die Kohlenstoffschichten nicht weiter untersucht.

Verglichen mit den Metallschichten, konnten bei der Beschichtung mit Bechem Multiprotect Korrosionsschutzwachs relativ niedrige Kräfte gemessen werden. Allerdings wurde die Wachsschicht beim Durchdrücken der Probezylinder durch den Beton fast vollständig entfernt. Dies würde im Praxiseinsatz nicht nur die Wiederverwendbarkeit der beschichteten Oberfläche einschränken, sondern auch die Qualität der frischen Betonoberfläche durch die Wachsrückstände im Beton nachteilig beeinflussen. Abbildung 20 zeigt die entschichtete Probe und die Wachsrückstände im Betonmantel.



Abbildung 20 Wachsrückstände im Betonmantel und entschichteter Probezylinder

Im Kraft Weg-Diagramm der wachsbeschichteten Probe (siehe Anhang IX) wird die Entschichtung ebenfalls sichtbar. Während bei allen andern Schichten die benötigte Kraft nach Überwindung der Anhaftungskraft stark abfällt, bleibt die Druckkraft bei der Wachsschicht relativ konstant bei über 1200N. Der geringe Kraftabfall resultiert aus der Flächenabnahme durch das Durchdrücken der Probe. Um ein verbessertes Ergebnis zu erzielen und die Schicht widerstandsfähiger zu machen, empfahl die Firma Mark Schmierstoffe GmbH das Wachs einzupolieren. Das Verhalten des eingepolierten Wachses wurde in Versuch II (siehe Kapitel 4.3) untersucht.

Die größte Trennkraft in Versuch I wurde bei der Gleitlackbeschichtung festgestellt. Ähnlich wie bei der Acryllackschicht im Praktikumsvorversuch [17], waren deutlich höhere Trennkräfte nötig als bei den unbehandelten Stahlproben. Für die erste Gleitmo-Probe mussten über 6500N aufgebracht werden. Grund hierfür ist das Bindemittel im Lack, welches starke Dipolkräfte zum Beton aufbaut. Dadurch werden die Adhäsionskräfte sehr stark. Anstelle einer Trennwirkung wird eine Verbesserung der Haftung an der Probenoberfläche erreicht. Die eingelagerten Teflon-Partikel können ihre Wirkung nicht entfalten, da sich vor der Beschichtung keine Transferschicht mit dem Trockenschmierstoff bilden kann. Anhand dieser Erkenntnis wurde die Probe vor der Durchführung von Versuch II einige Minuten poliert, um die Trockenschmierstoffe gleichmäßig auf der Probenoberfläche zu verteilen.

Da die teflonähnliche Kunststoffschicht und die Emailschiicht zum Zeitpunkt der Durchführung von Versuch I nicht fertiggestellt waren, wurden beide Schichten nachträglich untersucht. Die Messung der Trennkräfte erfolgte mit den korrigierten Parametern. Die Aushärungszeit für den Betonmantel betrug ebenfalls 48 Stunden.

Die Emailschiicht konnte zunächst durch ihre hohe Kratz- und Verschleißfestigkeit überzeugen. Die Oberfläche der Proben blieb ohne erkennbare Kratzer und Beschädigungen. Beim Vergleich mit den Trennkräften der Metallschichten fällt auf, dass zum Lösen des Betonmantels von der Emailschiicht nur ca. ein Viertel der Maximalkraft für Nickel- bzw. Hartchromschichten benötigt wird. Trotzdem wird die Grenzkraft um mehr als das Doppelte überschritten, sodass der Einsatz von Emaille als verschleißfeste Antihafschicht nicht empfohlen werden kann. Außerdem spricht die Schlagempfindlichkeit der Emaille gegen eine Anwendung der Schicht auf Geräten des Baugewerbes, da Stöße und Hammerschläge zu einer schnellen Zerstörung der Beschichtung führen würden.

Durch das Aufbringen der PTFE/PFA/FEP-Schicht konnten äußerst positive Ergebnisse erzielt werden. Die Trennkräfte lagen teilweise sogar einige Newton unter den Referenzwerten der trennmittelbehandelten Proben. Die stark hydrophoben Eigenschaften der Schicht behindern die Anhaftung offenbar im selben Maße, wie es bei der Anwendung von Trennmitteln der Fall ist.

Daher scheinen die fluorierten Kunststoffschichten im Schichtsystem Rhenolease Mk V der Firma Rhenotherm geeignet, um die Anhaftung von Beton an Baugeräten zu verhindern. Zukünftige Untersuchungen sollten sich vor allem der Haltbarkeit der Schichten widmen. Bei der Betrachtung der Schichten nach dem Trennen wurden mehrere kleine Kratzer sichtbar. Über die Auswirkung der Kratzer auf den Antihafteffekt der Schicht kann keine Aussage gemacht werden. Hierfür sind weitere Versuche zu der genannten Problematik abzuwarten. Der Betonmantel zeigte keine Verfärbungen oder Schichtrückstände, was einen Einsatz bei der Fertigung von Sichtbetonflächen ermöglichen würde. Aufgrund der geringen Kratzbeständigkeit sollte der Einsatz solcher Schichten auf Flächen beschränkt werden, die keiner abrasiven Belastung durch den Beton ausgesetzt sind. Eine Einsatzmöglichkeit wäre die Außenbeschichtung verschiedener Geräte um eine schnellere und gründlichere Reinigung zu ermöglichen. Neben der vereinfachten Instandsetzung nach Baustelleneinsetzen können sich solche Schichten auch positiv auf das Firmenimage auswirken, da saubere Oberflächen immer ein Merkmal gesteigerter Qualität sind.

4.3 Versuch II - Aushärtungszeit 72Stunden

Im Versuch II wurde die Aushärtungszeit auf 72 Stunden erhöht, um zu überprüfen, ob verlängerte Reinigungsintervalle den Aufbau starker Haftkräfte begünstigen würden. Zudem sollte ein typisches Baustellenszenario simuliert werden. Häufig wird freitags Betoniert, da die Baustelle am Wochenende ruht. So kann der Beton zunächst Festigkeit aufbauen. Oft wird am folgenden Montag, wenn die Baustelle wieder den Betrieb aufnimmt, ausgeschalt. Es sollte also auch nach Ablauf der 72 Stunden noch möglich sein, die Schalung möglichst leicht von Betonrückständen zu befreien und Geräte und Werkzeuge zu reinigen. Mit dem Einsatz von Trennmitteln kann das bereits erreicht werden. Ob dies auch mit einer dauerhaften Beschichtung möglich ist, sollte der Versuch II zeigen.

Die Kurvenverläufe ähneln den aufgenommen Diagrammen bei der Bestimmung einer Referenzkraft für unbeschichtete Stahloberflächen und können Anhang X entnommen werden. Zunächst wurde eine starke Druckkraft aufgebaut. Diese fiel unmittelbar nach der Trennung stark ab und sank danach weiter, je mehr Messstrecke zurückgelegt wurde. Beim Vergleich der Zahlenwerte muss berücksichtigt werden, dass im Versuch I verschiedene Probleme aufgetreten sind, die das Ergebnis teilweise beeinflusst haben (siehe dazu Kapitel 4.2). Tabelle 6 zeigt die Übersicht aller Messergebnisse in Versuch II.

verwendete Beschichtung	Maximalkraft (in N) und Maximalspannung (in N/mm ²) während der Trennung	Zustand der Beschichtung nach der Trennung	Weitere Untersuchung über den Einfluss von Luftporenbildner
getempert	4297	keine sichtbare Beschädigung	Ja
Nickelphosphor	0,684		
Nickelphosphor mit PTFE-Einlagerungen	4105	keine sichtbare Beschädigung	Ja
	0,653		
Hartchrom	5063	keine sichtbare Beschädigung	Ja
	0,806		
Gleitlack - Gleitmo_980 (poliert)	4058	zahlreiche Kratzer	Nein
	0,646		
Korrosionsschutzwachs - Bechem (poliert)	1564	einige kleine Kratzer	Nein
	0,249		
Emaile	1091	keine sichtbare Beschädigung	Ja
	0,174		
Kunststoff aus PTFE/PFA/FEP	853	wenige kleine Kratzer	Ja
	0,136		

Tabelle 6 Versuchsergebnisse von Versuch II

Obwohl die Oberflächen der Metallschichten keine Beschädigung erkennen lassen, kann das Ergebnis der Kraftmessung nicht befriedigen. Die Trennkräfte betragen mehr als das Zehnfache der Referenzwerte für die Verwendung von Trennmittel. Verglichen mit Versuch I stieg die benötigte Druckkraft für die Trennung der Hartchromprobe noch weiter an. Zusätzlich wurden starke Reibkräfte von über 2000N gemessen. Auch die Messwerte für die getemperte Nickelprobe übersteigen 4000N, allerdings sanken die Werte nach Überwindung der Haftung auf Reibwerte unter 500N ab. Die Messwerte belegen, dass beide Beschichtungen die Anhaftung des Betons nicht verhindern können.

Auffällig ist der starke Anstieg der Maximalkraft bei der Nickelschicht mit eingelagerten Teflon-Partikeln. Im Vergleich zu Versuch I fällt auf, dass die Kraft um ca. 1200N anstieg und dabei das Kraftniveau der getemperten Nickelschicht ohne Dispersionspartikel erreicht. Dabei wurden bei den Schichten mit PTFE-Einlagerungen höhere Reibkräfte aufgezeichnet als bei den einfachen Nickelphosphorschichten.

Ein ähnlich starker Anstieg der Maximalkraft konnte bei der Kunststoffschicht aus PTFE/PFA und FEP beobachtet werden. Es wird daher vermutet, dass eine Erhöhung der Aushärtungszeit den Antihafteffekt von PTFE und seinen Co-Polymeren stark abschwächt. Daraus könnte ein maximaler Zeitintervall für die Reinigung von Schalungen und Geräten abgeleitet werden, der beim Praxiseinsatz entsprechender Beschichtungen eingehalten werden muss.

In Vorbereitung auf den zweiten Versuch wurde der Probezylinder mit der Gleitlackbeschichtung fünf Minuten poliert, um den Trockenschmierstoff gleichmäßig auf der Oberfläche zu verteilen. Dadurch konnte die Trennkraft im Vergleich zu Versuch I um über 2000N gesenkt werden. Eine Eignung des Gleitlacks als dauerhafte Beschichtung lässt sich davon allerdings nicht ableiten, da die Trennkraft mit 4058N trotzdem den Referenzwert von unbeschichtetem Stahl übersteigt und somit die Anhaftung eher erleichtert, anstatt eine trennende Wirkung zu erzielen. Außerdem weist die Schicht bereits nach einer Versuchsdurchführung zahlreiche Kratzer auf, sodass nicht von einer langen Lebensdauer ausgegangen werden kann.

Das Messergebnis der Wachsschicht konnte durch vorheriges Polieren der Probe ebenfalls positiv beeinflusst werden. Die Beschichtung weist allerdings sichtbare Kratzer auf, die auf eine geringe Haltbarkeit der Schicht schließen lassen. Im Gegensatz zu Versuch I, sind keine Rückstände der Schicht am Betonmantel zu sehen. Die Trennkraft liegt mit 1564N deutlich unterhalb der Messwerte der Metallschichten. Der definierte Grenzwert für eine Eignung der Schicht wird allerdings weit überschritten, sodass ein Einsatz als Antihafschicht für den Betonbau nicht in Frage kommt.

Wie schon in Versuch I wurden zur Trennung der Emailschiicht geringere Kräfte als bei den anderen Beschichtungsalternativen (mit Ausnahme der Kunststoff-PTFE-Schicht) gemessen. Kratzer, Abtragungen oder Abplatzungen sind auf der Oberfläche des Probezylinders nicht zu erkennen. Trotzdem wird der Eignungsgrenzwert mit 1091N überschritten, wodurch auch die Emailschiichten nicht für den praktischen Einsatz zu empfehlen sind. Zusätzlich spricht die Schlagempfindlichkeit der Emailschiichten gegen den Einsatz auf Baustellen, da Hammerschläge und starke Stöße leicht zu Abplatzungen und somit zur Zerstörung der Beschichtung führen könnten. In Anhang VII sind der Arbeit Bilder beigelegt, die unter Anderem Abplatzungen an den Emailschiichten zeigen.

Wie oben erwähnt stieg die Kraft zur Trennung der fluorierten Kunststoffschicht, durch die Erhöhung der Aushärtungszeit auf 853N an. Somit wird auch hier der Grenzwert für die Eignung als Antihafschicht überschritten. Einige Betonreste, die häufig auch nach der Trennung in der Probenmitte anhafteten, konnten allerdings nachträglich deutlich einfacher entfernt werden, als bei allen anderen Schichtalternativen, bei denen eine nachträgliche Entfernung dieser Reste oft unmöglich war. Ähnlich wie nach Versuch I, zeigt die Oberfläche nach der Trennung einige kleine Kratzer, deren Auswirkungen in weiteren Eignungsuntersuchungen analysiert werden sollten. Aufgrund der erhöhten Trennkräfte, die nach zusätzlichen 24 Stunden Aushärtungszeit gemessen werden, empfiehlt sich eine tägliche Reinigung der Bauteile. Ob aus dem Beschichtungssystem trotzdem ein wirtschaftlicher Nutzen gezogen werden kann, wird in Kapitel fünf untersucht.

4.4 Versuch III - Betonzusatzmittel: Luftporenbildner

Anhand von Versuch III sollte untersucht werden, ob sich ein Zusammenhang zwischen der auftretenden Haftkraft und dem Einsatz von Betonzusatzmitteln herstellen lässt. Da im Rahmen dieser Arbeit nicht die gesamte Bandbreite von möglichen Additiven untersucht werden kann, sollte die Untersuchung zunächst exemplarisch mit dem Zusatzmittel Luftporenbildner (Mischöl LP 71, Datenblatt siehe [46]) durchgeführt werden. Informationen zur Wirkung von Luftporenbildner und anderen Additiven sind in Kapitel 1.2.3 "Betonzusatzmittel" zusammengefasst. Der Beton wurde im selben Mischungsverhältnis wie in allen übrigen Versuchen angemischt (siehe dazu Kapitel 2.3. "Vorbereitung der Versuche"). Zusätzlich wurden der Mischung 0,4 Masseprozent (20ml) Luftporenbildner zugesetzt. Die Aushärungszeit betrug 48 Stunden. Tabelle 7 gibt zunächst eine Übersicht über alle Messergebnisse aus Versuch III und liefert die Vergleichswerte aus den Vorversuchen. Es wurden nur Schichten untersucht, für die sowohl Versuch I als auch Versuch II Vergleichswerte liefern. Alle Kraft-Weg-Diagramme können Anhang XI entnommen werden.

verwendete Beschichtung	Maximalkraft (in N) und Maximalspannung (in N/mm ²) während der Trennung	Maximalkraft (in N) und Maximalspannung (in N/mm ²) aus Versuch I	Maximalkraft (in N) und Maximalspannung (in N/mm ²) aus Versuch II
getempert	1477	4297	4837
Nickelphosphor	0,235	0,648	0,769
Nickelphosphor mit PTFE-Einlagerungen	1642 0,261	2886 0,459	4105 0,653
Hartchrom	1429 0,227	4782 0,761	5063 0,806
Emaile	756 0,120	975 0,155	1091 0,174
Kunststoff aus PTFE/PFA/FEP	144 0,023	170 0,027	853 0,136

Tabelle 7 Versuchsergebnisse von Versuch III und Vergleichswerte aus den Vorversuchen

Es wird deutlich, dass der Luftporenbildner die auftretenden Maximalkräfte herabsetzt. Dabei sind die Ergebnisse für die Metallschichten, wie bereits bei den vorhergehenden Versuchen festgestellt werden konnte, sehr ähnlich. Obwohl die Trennkkräfte um mehr als die Hälfte gesenkt wurden, kann der Eignungsgrenzwert nicht unterschritten werden. Der Zustand der Metalloberflächen blieb auch nach diesen Versuch ohne sichtbare Beschädigungen.

Die benötigte Trennkraft der Emailschiicht wurde durch den Zusatz im Beton ebenfalls leicht gesenkt. Gleiches gilt für die fluoridierte Kunststoffbeschichtung. Die Bildung von Luftporen scheint die Anhaftung zu behindern, sodass niedrigere Trennkkräfte gemessen werden. Da nach der Trennung nur wenige Luftporen an der Innenseite des Betonmantels sichtbar wurden, muss der Luftporenbildner neben der Minderung der vorhandenen Anhaftungsfläche noch weitere Einflüsse auf das Adhäsionsverhalten des Betons nehmen. Eventuell beeinflusst das Additiv im Beton die Oberflächenspannung des Betonwassers, sodass die Benetzung der Probenoberfläche erschwert wird.

Um hierüber Klarheit zu gewinnen sind weitere Versuche zu dieser Problematik erforderlich. Im Rahmen zusätzlicher Untersuchungen sollten auch die Einflüsse anderer Betonzusatzmittel und Betonparameter, wie der Wasser-Zement-Wert, analysiert werden.

5 Kosten-Nutzen Analyse

Eine funktionale Beschichtung gegen die Betonanhaftung erweist sich erst dann als sinnvoll, wenn tatsächlich Kosten eingespart werden können. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Abschätzung der Kosten und Einsparungsmöglichkeiten beim Umgang mit betonverarbeitenden Geräten. Die Angaben über die Stundensätze und zu erwartende Reinigungszeiten wurden von der BMTI GmbH zur Verfügung gestellt.

Während der durchgeführten Versuche stellten sich PTFE/PFA/FEP-Schichten als einzige Möglichkeit heraus der Betonanhaftung durch das Aufbringen einer dauerhaften Funktionsschicht vorzubeugen. Da die antiadhäsiven Eigenschaften entsprechender Schichten sich nicht mit den Anspruch an Verschleiß- und Abriebwiderstand gegen Beton vereinbaren lassen, sollen sich alle Überlegungen zur Anwendung solcher Schichten auf Flächen von Baumaschinen und Geräten beziehen, die zwar durch die Betonanhaftung beeinflusst werden, aber keiner abrasiven Beanspruchung widerstehen müssen.

Eine Abschätzung der zu erwartenden Kosten für die Anwendung des Rhenorelease Mk V Schichtsystems (fluorierte Kunststoffschichten, siehe Kapitel 3.8) von Seiten der Firma Rhenotherm war leider nicht möglich, sodass im Rahmen dieser Arbeit nur abgeschätzt werden kann, wieviel eine entsprechende Beschichtung kosten darf, damit sich die Investition noch vor dem Abtrag der Schicht amortisiert (Grenzpreis). Da keine Angaben über die zu erwartende Haltbarkeit der Beschichtung für Außenanwendungen vorliegen, wurden drei verschiedene Szenarien berechnet, bei denen sich der Zeitraum der täglichen Bauteilreinigung jeweils verlängert. Der Reinigungszeitraum soll dabei dem Haltbarkeitszeitraum der Beschichtung entsprechen. Die Berechnung der Reinigungskosten über die vorgegebenen Zeiträume erfolgt auf der Grundlage eines Betonkübels, welcher in Abbildung 21 dargestellt wird. Ziel dieser Berechnung soll eine Abschätzung über den Grenzpreis pro Quadratmeter der Kunststoffschicht als Grundlage für weitere Entwicklungen und Überlegungen sein.

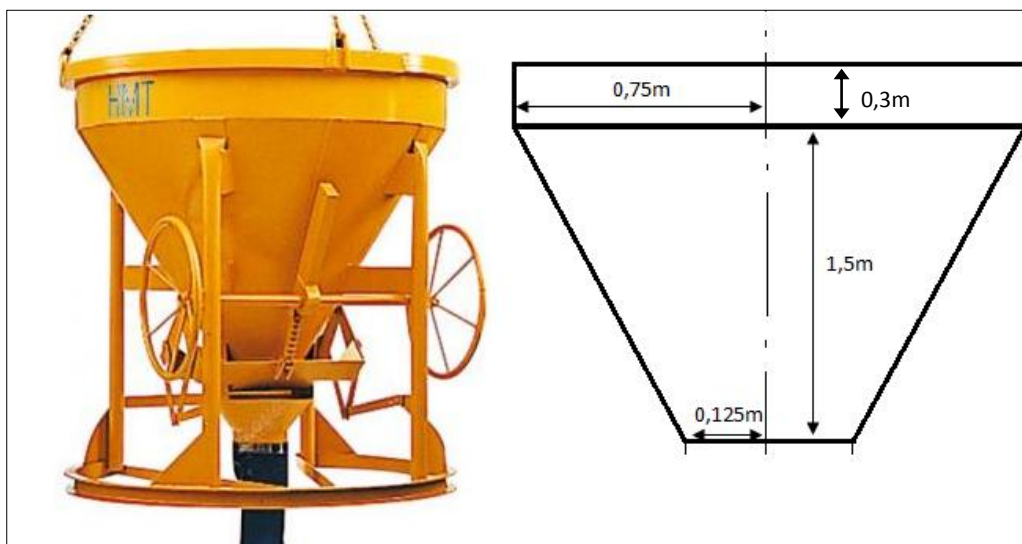


Abbildung 21 Betonkübel mit Skizze [47]

Zunächst soll die zu beschichtende, bzw. zu reinigende Fläche des Kübels berechnet werden. Aufgrund der komplizierten Geometrie wurde die Flächenrechnung zur Vereinfachung auf den Kegelstumpf und den Zylinder beschränkt. Um eine schnellere und bessere Reinigung des Kübels zu erreichen, wird allerdings davon ausgegangen, dass alle Elemente beschichtet werden. Die Gesamtfläche wird durch Multiplikation der Mantelfläche mit einem Korrekturfaktor abgeschätzt.

$$A_{\text{Mantel}} = A_{\text{KM}} + A_{\text{ZM}} = [(r_1 + r_2) * \pi * h_1] + [d_{\text{Kübel}} * \pi * h_{\text{Zylinder}}]$$

$$A_{\text{Mantel}} = [(0,75\text{m} + 0,125\text{m}) * \pi * 1,5\text{m}] + [0,3 * \pi * 0,3\text{m}] = 5,54\text{m}^2$$

$$\longrightarrow A_{\text{Gesamt}} = A_{\text{Gerät}} = A_{\text{Mantel}} * k = 5,54\text{m}^2 * 1,3 \approx \mathbf{7,2\text{m}^2}$$

Auf Grundlage dieser Flächenbestimmung können die zu erwartenden Kosten für die Reinigung und die Verwendung von Trennmittel berechnet werden. Betonverarbeitende Geräte, wie der Betonkübel, müssten täglich mit leistungsstarken Trennmitteln benetzt und gereinigt werden, um auch nach dem Baustelleneinsatz erneut einsatzbereit gemacht werden zu können, ohne dabei Schäden durch eine grobe Reinigung mit Hammer und Nagelpistole hervorzurufen. Dafür müsste täglich etwa eine Arbeitsstunde aufgebracht werden. Bei einem Stundensatz von 43 Euro und Trennmittelkosten von 3€/l (siehe Angebot für MSBI MS/9 Anhang XII) ergeben sich die Kosten für die Reinigung wie folgt:

$$K_{\text{Gesamt i}} = [K_{\text{Lohn}} * (t_{\text{Reinigung}} + t_{\text{TM Auftrag}}) * T_{\text{Beschichtung}}] + [K_{\text{Trennmittel}} * A_{\text{Gerät}} * V_{\text{Trennmittel}} * T_{\text{Beschichtung}}]$$

Für die Haltbarkeit der Beschichtung können keine genauen Aussagen getroffen werden, da keine belegbaren Erfahrungen für den Außeneinsatz von PTFE-Kunststoffschichten vorliegen. Daher wurde die Berechnung mit drei verschiedenen Haltbarkeitszeiträumen, nämlich zwei Wochen, vier Wochen und acht Wochen, durchgeführt.

$$K_{\text{Gesamt 1}} = (43\text{€/h} * 1\text{h} + 3\text{€/l} * 7,2\text{m}^2 * 0,1\text{l/m}^2) * 10 = \mathbf{451,6\text{€}}$$

$$K_{\text{Gesamt 2}} = 45,16 * 20 = \mathbf{903,2\text{€}}$$

$$K_{\text{Gesamt 3}} = 45,16 * 40 = \mathbf{1806,4\text{€}}$$

Ein Überzug der äußeren Flächen mit einer Antihafschicht, welche das Anbacken von Betonresten erschwert, würde die Reinigungskosten deutlich senken. Außerdem könnte auf den Auftrag von Trennmitteln verzichtet werden. Ein Verzicht auf die tägliche Reinigung wird auch mit Antihafschichten nicht möglich sein. Es soll davon ausgegangen werden, dass der Zeitaufwand pro Arbeitstag auf ein Zehntel reduziert werden kann. Die verminderten Kosten ergeben sich dabei wie folgt:

$$K_{\text{vermindert } i} = [K_{\text{Lohn}} * (0,1 * t_{\text{Reinigung}}) * T_{\text{Beschichtung}}]$$

$$K_{\text{vermindert } 1} = 43\text{€/h} * 0,1\text{h} * 10 = \mathbf{43\text{€}}$$

$$K_{\text{vermindert } 2} = 43\text{€/h} * 0,1\text{h} * 20 = \mathbf{86\text{€}}$$

$$K_{\text{vermindert } 3} = 43\text{€/h} * 0,1\text{h} * 40 = \mathbf{172\text{€}}$$

Da keine Angaben über den Preis für eine entsprechend funktionale Beschichtung vorliegt, soll lediglich berechnet werden, wieviel eine Beschichtung maximal Kosten darf, um sich innerhalb des Nutzungszeitraumes zu rentieren. Um einen wirtschaftlichen Nutzen aus der Beschichtung zu ziehen, darf der Preis der Beschichtung die unter den gemachten Annahmen berechneten Grenzen nicht überschreiten. Die Preisgrenze ergibt sich aus den Gesamtkosten für jedes Haltbarkeitsszenario. Die verminderten Kosten für die tägliche Reinigung, die auch bei beschichteten Bauteilen anfallen würden, werden von den Gesamtkosten abgezogen. Zusätzlich wird eine Transportpauschale von 200€ abgerechnet, da die zerstörte Beschichtung ausgetauscht werden muss. Das Ergebnis wird ins Verhältnis zur Gesamtfläche des betrachteten Gerätes gesetzt. Es ergibt sich folgende Berechnung:

$$P_{\text{Grenz } i} = (K_{\text{Gesamt } i} - K_{\text{vermindert } i} - K_{\text{Transport}}) / A_{\text{Gesamt}}$$

$$P_{\text{Grenz } 1} = (451,6\text{€} - 43\text{€} - 200\text{€}) / 7,2\text{m}^2 = \mathbf{28,97\text{€/m}^2}$$

$$P_{\text{Grenz } 2} = (903,2\text{€} - 86\text{€} - 200\text{€}) / 7,2\text{m}^2 = \mathbf{85,7\text{€/m}^2}$$

$$P_{\text{Grenz } 3} = (1807,2\text{€} - 172\text{€} - 200\text{€}) / 7,2\text{m}^2 = \mathbf{199,3\text{ €/m}^2}$$

Wie zu erwarten steigt der zulässige Grenzpreis pro Quadratmeterbeschichtung durch die Verlängerung der Haltbarkeit stark an. Um genauere Erkenntnisse zu gewinnen müssen konkrete Preisangaben von Herstellerseite gemacht werden, bzw. die tatsächliche Haltbarkeit der Beschichtung bei Baustelleneinsetzten und Witterungseinflüssen näher untersucht werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die konträren Ansprüche an die Eigenschaften von Antihafschichten für den Betonbau lassen sich von keiner der untersuchten Schichtalternativen vollständig erfüllen. Allerdings können einige positive Tendenzen ausgemacht werden, mit deren Hilfe man der Problematik von anhaftendem Beton an den Oberflächen von Baumaschinen und Werkzeugen zukünftig begegnen könnte.

Die Beschichtungen der Proben mit dem Gleitlack "Gleitmo 980" und dem Korrosionsschutzwachs "Bechem Multiprotekt" konnten weder den Anforderungen an die Verschleißbeständigkeit, noch den Erwartungen an eine Antihafwirkung gerecht werden. Obwohl alle untersuchten Metallschichten einen besseren Verschleißschutz bieten und zusätzlich die Korrosion der Bauteile behindern würden, konnten keine Erfolge beim Hauptziel der Untersuchung, nämlich einer Verminderung der Adhäsionskräfte zwischen Beton und Bauteiloberfläche, erzielt werden. Gleiches gilt für die Emailsichten, die zwar kratzfest, aber nicht schlagbeständig sind und auch keine Antihafwirkung erzielen können.

Die einzige Beschichtungsoption, mit der ähnlich gute Ergebnisse wie durch den Auftrag von Trennmitteln erreicht werden können, bieten die fluorierten Kunststoffschichten aus PTFE, PFA und FEP. Im Versuch wurde das Schichtsystem Rhenolease MK V der Firma Rhenotherm untersucht. Für kurze Aushärtzeiten von 48 Stunden waren die Ergebnisse mit den Referenzwerten für trennmittelbenetzte Proben vergleichbar. Schwächen der Beschichtung wurden durch eine Verlängerung der Aushärtungszeit deutlich. Während bei den Trennmittelproben nur ein geringer Anstieg der Trennkraft gemessen wurde, stieg die Maximalkraft beim Trennen der Teflonschicht stark an und überschritt die definierten Eignungsgrenzwerte. Daraus leitet sich ein maximales Reinigungsintervall für entsprechend beschichtete Oberflächen von 48 Stunden ab, damit das Schichtsystem im Praxiseinsatz einen möglichst langen Haltbarkeitszeitraum überdauern kann.

Aktuell ist kein Schichtsystem auf dem Markt, das starken Verschleißbelastungen durch Beton langfristig widerstehen kann. Daher kommt eine Anwendung auf abrasiv beanspruchten Flächen, wie den Innenflächen von Betonkübeln oder den Außenflächen von Rüttelflaschen, nicht in Frage. Hier muss der Betonanhaftung weiterhin mit Trennmittel begegnet werden.

Ein breites Anwendungsgebiet könnte sich in der Beschichtung der Außenflächen von betonverarbeitenden Maschinen eröffnen. Häufig haftet der Beton auch an Flächen, an denen kein direkter Kontakt zum Beton vorgesehen ist. Oft werden diese Außenflächen durch spritzenden Beton stark verschmutzt und können ebenfalls nur durch großen Aufwand und Zeiteinsatz

gereinigt und wiederhergestellt werden. Ein prophylaktischer Trennmittelauftrag kann nicht täglich für alle entsprechende Flächen vorgenommen werden, da auf den Baustellen keine Zeit für Präventivmaßnahmen gegen eventuelle Verschmutzungen eingeplant werden kann.

Die wirtschaftlichen und technischen Auswirkungen, die solche anhaftenden Verschmutzungen zur Folge haben können sind enorm. Zunächst erleidet das Unternehmen einen erheblichen Imageschaden durch den Einsatz "verdreckter" Geräte. Außerdem verursachen die groben Reinigungsmaßnahmen vielfach Kerben im Grundmaterial, sodass ein erneuter Einsatz von tragenden Bauteilen wie Kransegmenten nicht zulässig wäre. Um dieser Problematik zu begegnen muss die Reinigung solcher Bauteile durch Sandstrahlen kostenintensiv von externen Firmen übernommen werden. Der Einbau von festen Betonrückständen, die von Kübeln abplatzen und in den Frischbeton stürzen, kann bei der Abnahme von Sichtbetonflächen zu beträchtlichen Abzügen bei der Bezahlung führen.

Diese Folgen der Betonverschmutzung können nur durch eine regelmäßige Reinigung der gefährdeten Flächen verhindert werden. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Kunststoffschichten aus PTFE, PFA und FEP könnten die Haftungskräfte zwischen Beton und Bauteiloberfläche vermindern und so die benötigten Reinigungszeiten um ein Vielfaches verkürzen. Um einen breiten Einsatz für das Baugewerbe zu realisieren, müssen zunächst weitere Versuche zur Haltbarkeit und zum Verhalten der Schicht bei Witterungsbedingungen abgewartet werden. Sollten sich die Ergebnisse dieser Arbeit dabei bestätigen, könnten fluoridierte Kunststoffschichten eine echte Alternative zu den aktuellen Verfahren auf Baustellen im Umgang mit Betonanhaftungen sein.

7 Literatur

- [1] Produktbroschüre Leyde:
www.leyde.com/Deutsch/prospekte/PDF/Brochure%20mek-zekafix.pdf
 (abgerufen: 11.07.12), S. 4

- [2] BASF: Admixture News, Nr.1 Jan 2008
www.basf-admixtures.ch/de/publikationen/Documents/071206_ASNews_Nr1.pdf
 (abgerufen: 11.07.2012), S.9ff

- [3] Bernd Hillemeier: Beton, Beton- und Stahlbetonbau 105 (Jun 2010), Heft 6, Ernst & Sohn Verlag Berlin S.339
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/best.201090053/pdf> (abgerufen: 06.07.12)

- [4] Horst Czichos (Hg.): Hütte - Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften 29. Auflage Springer Verlag, 1991, S. D32 Teilchenverbundwerkstoffe

- [5] Michaela Biscopig, Verein Deutscher Zementwerke(Hg.): Zementmerkblätter Betontechnik B2 2012,
<http://www.beton.org/fileadmin/pdfpool/Zementmerkblaetter/B2.pdf>
 (abgerufen: 09.07.12)

- [6] www.beton.de/betonarten-in-deutschland/(abgerufen: 12.07.12)

- [7] Horst Czichos (Hg.): Hütte - Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften 29. Auflage Springer Verlag, 1991, S. D23f Werkstoffe

- [8] Anorganische Bindemittel, www.imn.htwk-leipzig.de/~stich/Bilder_BI/II.II.pdf (abgerufen: 11.07.12), S.11

- [9] Otmar Hersel, Verein Deutscher Zementwerke (Hg.): Zementmerkblatt Betontechnik B1 2006, www.beton.org/fileadmin/pdfpool/Zementmerkblaetter/B1.pdf (abgerufen: 13.07.12)

- [10] HeidelbergCement (Hg.):
www.heidelbergcement.com/de/de/country/service/glossar/zusatzmittel.htm
(abgerufen:11.07.12)
- [11] Julius Hoesch GmbH & Co. KG (Hg.): Produktbroschüre Betonadditive, Feb.2008
http://www.julius-hoesch.de/AKZO_Broschuere_Zement_und_Beton_Additive_deutsch.pdf
(abgerufen: 10.07.12)
- [12] <http://www.hittmayr.at/typo3temp/pics/48dc2a4ea8.jpg>
- [13] Axel Schumann u.a. : Schal- und Trennmittel für den Betonbau, 2.Auflage Expert-Verlag
1994 S.20ff
- [14] BASF: Admixture News, Nr.1 Jan 2008
www.basf-admixtures.ch/de/publikationen/Documents/071206_ASNews_Nr1.pdf
(abgerufen: 11.07.2012), S.9ff
- [15] Valentin L.Popov: Kontaktmechanik und Reibung, Springer Berlin Heidelberg; Auflage: 1
(6. März 2009) S. 29f
- [16] http://www.avenarius-agro.at/root/classifImages/bilderhauptseitecms/jpg/highRes/avenarius/de/Gruppe_5_Bild_1.jpg
- [17] J. Näther: Praktikumsarbeit, Entwicklung eines Messverfahrens zur Ermittlung der Trennkraft zwischen Beton und Stahl, Hochschule Mittweida, Mai 2012
- [18] Bernhard Gaida und Kurt Aßmann u.a.: Technologie der Galvanotechnik, 1. Auflage Leuze-Verlag Bad Saulgau, 1996, S. 217 Abs. 3
- [19] Nasser Kanani: Galvanotechnik; Grundlagen, Verfahren und Praxis einer Schlüsseltechnologie, 2. Auflage Hanser-Verlag München, 2009, S. 16ff

- [20] Nasser Kanani: Chemische Vernicklung, Nickelphosphorschichten, Leuze-Verlag, Bad Saulgau; Auflage 1, 2007, S. 27ff
- [21] Strözel Oberflächentechnik: www.stroetzel.de/files/ch.jpg (abgerufen: 17.07.12)
- [22] Nasser Kanani: Chemische Vernicklung, Nickelphosphorschichten, Leuze-Verlag, Bad Saulgau; Auflage 1, 2007, S. 481ff
- [23] J.Meyer: Eigenschaften und Anwendungen von Chemischen Nickel-Dispersionsschichten, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Volume 39, Issue 12, December 2008, S. 958ff
- [24] AHC Oberflächentechnik: www.ahc-surface.com/de/oberflaechentechnik/verfahren/durni-coat.html (abgerufen: 17.07.12)
- [25] B. Gaida und K. Aßmann: Technologie der Galvanotechnik, 1.Auflage Leuze- Verlag 1996 S.203
- [26] <http://www.hartchrom.info/>
- [27] Jens Bohnet: Entwicklung eines Verfahrens zur Abscheidung technischer Chromschichten aus einem Chrom(III)-Elektrolyten, Jost-Jetter-Verlag Heimsheim, 2009
- [28] Nasser Kanani: Galvanotechnik; Grundlagen, Verfahren und Praxis einer Schlüsseltechnologie, 2. Auflage Hanser-Verlag München, 2009, S. 18
- [29] B. Gaida und K. Aßmann: Technologie der Galvanotechnik, 1.Auflage Leuze- Verlag 1996 S.201
- [30] Othmar Cornu: Gleitlacke – Alternativen zu Fett und Öl, Technische Rundschau, Maschinenelement, Juli 2011 S.24f
www.technische-rundschau.ch/dlCenter/tr/2011_7/TR0711_24-25.pdf
(abgerufen: 13.07.12)
- [31] Binder GmbH: Gleitlacke statt Schmierstoff, MO Metalloberfläche, Beschichten von Kunststoff und Metall, 64. Jahrgang, September 2010
http://www.bicoat.de/docs/mo_9_10.pdf (abgerufen: 13.07.12)

- [32] Fuchs Lubritech GmbH (Hg.): Gleitlacke -Die trockene Schmierung
(Informationsbroschüre des Unternehmens) www.fuchs-lubritech.com
- [33] Bernd Schultrich: Chemische Gasphasenabscheidung - CVD,
Vakuum in Forschung und Praxis, Volume 19, Issue 6, December 2007, S.32-34
- [34] <http://www.oxford-instruments.com/products/etching-deposition-growth/processes/deposition-processes/Pages/sic.aspx> (abgerufen: 19.07.12)
- [35] CeWoTec (Hg.): <http://www.cewotec.de/de/produkte/duennschichten/schichttypen#PA-CVD-Schichten> (abgerufen: 20.07.12)
- [36] www.atrspa.eu/allegati/prodotti/de/de_S235JR.pdf (abgerufen am 19.07.12);
Umrechnung in Vickers nach: www.metallograf.de/start.htm?/begriffe/tab-umrechnung.htm (19.07.12)
- [37] Helge Klaas: Mechanische Charakterisierung dünner Schichten mit Hilfe von Indenterverfahren und elastisch/plastischer Modellierung, 1. Auflage Verlagsgruppe Mainz GmbH Aachen, 2007 S.16 Abs. 2;
<http://verlag-mainz.de/contents/pdf/3861303493.pdf>(abgerufen: 19.07.12)
- [38] Karola Graupner: Diplomarbeit - Untersuchungen zur Hochrateabscheidung harter DLC-Schichten, TU Chemnitz, Okt. 2004, S. 3f
- [39] A.Hieke: Diamantähnliche Kohlenstoffschichten (DLC) - verschleißfest und reibarm,
Material-wissenschaft und Werkstofftechnik Volume 31, Issue 7, July 2000, S. 635-628
- [40] Jürgen Falbe und Manfred Regitz (Hg.): Römpp Chemie Lexikon, Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1992, Band 6, S. 4972
- [41] Deutscher Email Verband e.V. (Hg.): Technisches Email - Korrosion und Werkstoffauswahl - Herstellung Emaillierter Apparate, Informations- u. Bildungszentrum Email e.V. 2006, S. 4-14,

- [42] Fluorpolymergroup (Hg.).
<http://www.pro-kunststoff.de/wp-content/uploads/2010/07/tm-02-einfuehrung-in-die-verarbeitung-von-ptfe-kunststoffen-finale-fassung-juli-2010.pdf> (abgerufen: 04.08.12)
- [43] Dipl.-Ing. Metaller: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PTFE-Beschichtung.jpg>
(abgerufen: 20.08.12)
- [44] Dipl.- Ing. Volkmar Eigenbrod, Rhenotherm Kunststoffbeschichtungs GmbH:
Antihaftbeschichtungen für Lackieranlagen, JOT 8 Journal für Oberflächentechnik 2006
<http://www.rhenotherm.de/fileadmin/user/Dokumente/JOT-Artikel.pdf>
(abgerufen: 05.08.12)
- [45] Zeller/Gmelin:
http://www.zeller-gmelin.de/medias/sys_master/Dokumente/8800374620190/Divinol+Trennmittel.pdf?contentType=application%2Fpdf&realname=Divinol+Trennmittel (abgerufen 14.08.12)
- [46] BASF The Chemical Company (Hg.): Datenblatt LP 71
http://www.basf-cc.de/de/produkte/betonzusatzmittel/Luftporenbildner/MischoelLP71/Documents/TM_D___Mischoel_LP_71___020608.pdf (abgerufen: 25.08.12)
- [47] Haberkorn (Hg.):
<http://shop.haberkorn.com/sortiment/baubedarf/baustellenausruistung/betonkuebel>
(abgerufen: 23.08.12)

Glossar

Anode:	Elektrode die Elektronen aufnimmt. Chemisch findet die Oxidationsreaktion statt
Charge:	Gesamtheit aller Einheiten eines Produktes, die unter gleichen Bedingungen erzeugt wurden.
Dispersion:	Heterogenes Gemisch aus mindestens zwei Stoffen, die nicht einander löslich sind oder chemisch miteinander reagieren.
Elektrolyt:	Chemische Verbindung, die in Ionen dissoziiert, welche sich unter Einfluss eines elektrischen Feldes in Richtung der Feldlinien bewegen.
Katalysator:	Senken die Aktivierungsenergie chemischer Reaktionen, ohne selbst verbraucht zu werden.
Kathode:	Elektrode an der dem System Elektroden zugeführt werden. Aus chemischer Sicht findet die Reduktionsreaktion an der Kathode statt.
Portlandit:	Mineral das unter Anderem durch Umwandlungsreaktionen von Calciumsilicaten entsteht. Chemisch handelt es sich um Calciumhydroxid $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$.
Puzzolane:	Sind künstliche oder natürliche Gesteine. Als Betonzuschlagstoffe reagieren sie in einer puzzolanischen Reaktion mit Calciumhydroxid zu CSH-Phasen.
Sintern ₁ :	Brennen von einem Gemisch aus Kalkstein und Ton während der Zementherstellung.
Sintern ₂ :	Erhitzen von Bauteilen im Ofen während der Herstellung von Kunststoffschichten
Sandstrahlen:	Reinigung und Aufräufung der Oberfläche durch einen mit Schleifkörpern (Sand) versetzten Luftstrom
Tempern:	Erhitzen von Materialien über einen bestimmten Zeitraum, um mechanische Spannungen abzubauen oder Gefügeänderungen zu bewirken.
Tenside:	Substanzen, welche die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten, bzw. die Grenzflächenspannung zwischen benachbarten Phasen herabsetzen.
Tribologie:	Befasst sich mit den Wechselwirkungen von Oberflächen in relativer Bewegung zueinander, insbesondere mit Reibung und Verschleiß.

- Vickershärte: Prüfverfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen das mechanische Eindringen einer gleichseitigen Diamantpyramide (Benennung nach Vickers Ltd.)
- Viskosität: Maß für die Zähflüssigkeit von Fluiden. Je größer die Viskosität, desto geringer die Fließfähigkeit.

Danksagung

Mein Dank gilt Prof. Dr. rer. nat. Frank Köster für die Unterstützung und Betreuung während der Bachelorarbeit.

Ein besonderer Dank gilt Dipl.-Bw. Karsten Just für die Hilfe bei der Themensuche in Vorbereitung auf Praxis- und Bachelorprojekt und für zahlreiche Diskussionen und Anregungen während der Anfertigung der Abschlussarbeit.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Kollegen der BMTI GmbH in Radefeld bedanken, die mir bei Problemen stets helfend zur Seite standen.

Weiterhin gilt mein Dank den Ausbildern von Siemens Professional Education in Chemnitz, für die Fertigung der Proben.

Für die Herstellung der Probebeschichtungen geht mein Dank an meine Ansprechpartner Lars Kübler von der CeWoTec in Chemnitz, Christian Grieger von der MBW Group in Hartha, Kerstin Kahmann von der Rhenotherm GmbH, Olivier Knauf von Omeras, Andreas Prantler von der Mark Schmierstoffe GmbH und an die AHC Oberflächentechnik.

Ein weiteres Dankeschön gilt Prof. Dr.-Ing. Frank Müller und Frau Bergner für die Zusammenarbeit bei der Durchführung der Versuche.

Natürlich möchte ich mich auch bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich während des gesamten Studiums unterstützt und die Studienzeit verschönert haben.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei allen Korrekturlesern bedanken.

Anhang

I. Prüfprotokoll Hegewald und Peschke -

Universalmessmaschine Inspect retrofit 100kN MFX _____ ii

II. Skizze der beschichteten Proben _____ ii

III. Technische Daten des HOMMEL TESTER T1000 _____ iii

IV. Ergebnisse der Rauigkeitsmessung _____ iv

V. Bilder zur Versuchsvorbereitung _____ vii

VI. Datenblatt des Nickelelektrolyten _____ viii

VII. Bilder zum Oberflächenzustand der Schichten nach den Versuchen _____ x

VIII. Kraft-Weg-Diagramme der Referenzwertbestimmung - 48/72 Stunden Aushärtungszeit _____ xi

IX. Kraft-Weg-Diagramme zu Versuch I - 48 Stunden Aushärtungszeit _____ xiii

X. Kraft-Weg-Diagramme zu Versuch II - 72 Stunden Aushärtungszeit _____ xvii

XI. Kraft-Weg-Diagramme zu Versuch III 48Stunden Aushärtungszeit - Betonzusatzmittel:

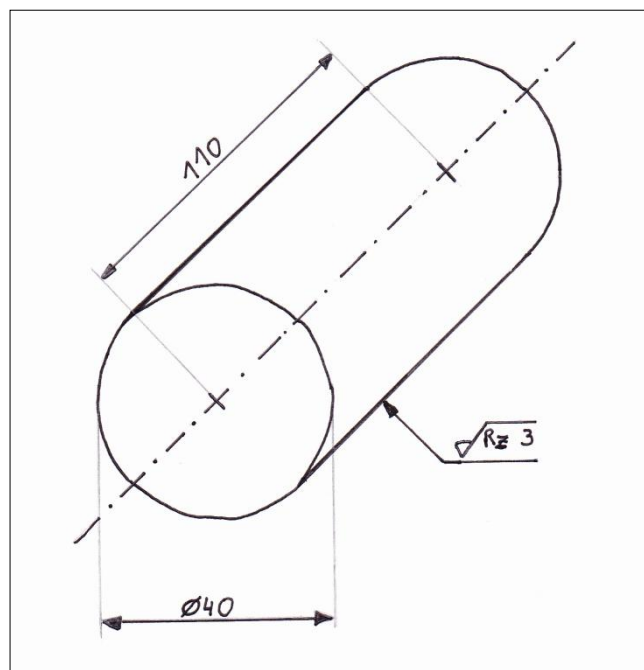
Luftporenbildner _____ xxi

XII. Preisangebot - Trennmittel _____ xxivv

I. Prüfprotokoll Hegewald und Peschke - Universalmeßmaschine Inspect retrofit 100kN MFX

Prüfkriterien	Technische Daten	Einschätzung	Bemerkungen
Kapazität	max. 100 kN	o.k.	
Kraftmeßgenauigkeit	besser Klasse 1 nach EN 1002 im Bereich von 0,4 - 100% des Nennwertes	o.k.	
Traversengeschwindigkeit in mm	Prüfgeschw.: 0,5 mm/min-1000 mm/min (14 Stufen)	o.k.	
	Rücklauf: 1000 mm/min (1 Stufe)	o.k.	
Kraftverstärker	Verstärkung: 7 Stufen (1;2;5;10;20;50;100) 1,5 mV/V	o.k.	
Sicherheitseinrichtungen	Traversenbegrenzungsschalter Überlastungsschutz, Notschalter	o.k.	
Optionen	Probenbruch, ext. Input, Daten print, Zyklenzähler, Stroke Display/out, File	o.k.	

II. Skizze der beschichteten Proben



III. Technische Daten des HOMMEL TESTER T1000

9.4 Technische Daten

9.4.1 HOMMEL TESTER T1000

	HOMMEL TESTER T1000 basic	HOMMEL TESTER T1000 top	HOMMEL TESTER T1000 wave
	Art.-Nr. 240850	Art.-Nr. 240860	Art.-Nr. 240865
Display	Hinterleuchtetes Grafikdisplay, 240 x 160 dots		
Stromversorgung	Ni-Metallhydrid-Akku Netzteil 24V/2,5A; automatische Umschaltung 90-240V		
Akku-Kapazität	ca. 1000 Messungen		
Betriebstemperatur	0-50°C, max. 85% relat. Feuchte		
Schnittstellen	V24/RS232		
Datenspeicher	200 Profile / 999 Messungen		
Messprogramme	5 Messprogramme	5, bis zu 18 (mit Flashcard)	5, optional bis zu 18 (mit Flashcard)
PCMCIA Laufwerk	-	integriert	Option
PC Flashcard 8 MB	-	integriert	Option
Abmessungen B x T x H [mm]	253 x 193 x 80		
Gewicht [g]	1600	1620	1640
Mess-Art	Gleitkufenmessung		Gleitkufenmessung Bezugsebenenmessung
Gesamtabweichung lt. DIN 4772	Klasse 1		
Messbereiche / Auflösung	$\pm 80 \mu\text{m}$ / $0,01 \mu\text{m}$; $\pm 320 \mu\text{m}$ / $0,04 \mu\text{m}$		
Geräteeinstellung	automatisch oder manuell		
Filter			
DIN EN ISO 11562, Teil 1 (50% Gauß)	Gauß (M1) Digitalfilter [mm] → 0,025 / 0,08 / 0,8 / 2,8 / 8 -wählbar in 1 Cut Off-Stufen		
DIN EN ISO 13565-1	2-fach Gauß (M2) Rk-Parameter		
Taststrecke Lt [mm]	0,48 / 1,5 / 4,8 / 15 / max. 16		0,48 / 1,5 / 4,8 / 15 /
DIN EN ISO 4288 /	variabel von 0,48-16mm		max. 20
DIN EN ISO 12085 (MOTIF)			variabel von 0,05-20 mm
Messstrecke ln DIN EN ISO 4287	0,4 / 1,25 / 4,0 / 12,5		
Einzelmessstrecken lr, lw, lp nach DIN EN ISO 4287	1 - 5 wählbar		
Tastgeschwindigkeit [mm/s]	automatisch f(Lt), Fremd-LV, variabel 0,15-1,0		automatisch f(Lt), Fremd-LV, variabel 0,05-2,0
Cut Off λ [mm]	0,08 / 0,25 / 0,8 / 2,5 / 8,0		
Bandpassfilter Lc/Ls DIN EN ISO 3274	100 / 300		
Rauheitsparameter (Kenngrößen) DIN EN ISO 4287	Ra, Rz (Rz4, Rz3, Rz2, Rz1), Rmax, Rt, Rq, RPc, RSm, Rmr(c), Rp, Rpm, R3z, Rz-ISO, Rsk, Rku		

T1000

9-3

IV. Ergebnisse der Rauigkeitsmessung

Messprotokoll

Fakultät Maschinenbau
FG Fertigungstechnik
Technikumplatz 17
09648 Mittweida



Hommeltester T1000 basic mit Tastspitze T1E KE2/90D

Firma: Hochschule Mittweida
Abteilung: Labor 3 (5-032B)

HOMMELWERKE
Turbo Datawin-NT V1.48

Meßbedingungen

Tastertyp : T1E
Meßbereich : 80 μm
Taststrecke : 4.80 mm
Lc (Cut Off) : 0.800 mm
Filter : ISO 11562(M1)

11.05.12
09:59

Verfahren: Schleifen

Werkstoff: Stahl

Bemerkungen: Teil 1

Rauheitsprofil	Rauheitsparameter	Materialanteil
R- Profil ausgerichtet Filter ISO Taster T1E Lt = 4.80 mm 4.80	RSm 0.1989 mm Ra 0.26 μm RzISO 2.06 μm Rt 2.33 μm Pt 2.40 μm Wt 0.44 μm Rmr09(90.0 %) 1.35 μm	R-Profil Materialanteil 0.0 2.33 0% 20% 40% 60% 80% 100%
R- Profil ausgerichtet Filter ISO Taster T1E Lt = 4.80 mm 4.80	RSm 0.3175 mm Ra 0.25 μm RzISO 2.21 μm Rt 2.52 μm Pt 2.68 μm Wt 0.62 μm Rmr09(90.0 %) 1.33 μm	R-Profil Materialanteil 0.0 2.52 0% 20% 40% 60% 80% 100%
R- Profil ausgerichtet Filter ISO Taster T1E Lt = 4.80 mm 4.80	RSm 0.3391 mm Ra 0.23 μm RzISO 2.51 μm Rt 3.15 μm Pt 3.21 μm Wt 0.38 μm Rmr09(90.0 %) 1.19 μm	R-Profil Materialanteil 0.0 3.16 0% 20% 40% 60% 80% 100%

Messprotokoll

Hommeltester T1000 basic mit Tastspitze T1E KE2/90D

Fakultät Maschinenbau
FG Fertigungstechnik
Technikumplatz 17
09648 Mittweida



Firma: Hochschule Mittweida
Abteilung: Labor 3 (5-032B)

HOMMELWERKE
Turbo Datawin-NT V1.48
Meßbedingungen
Tastertyp : T1E
Meßbereich : 80 µm
Taststrecke : 4.80 mm
Lc (Cut Off) : 0.800 mm
Filter : ISO 11562(M1)

11.05.12
10:06

Verfahren: Schleifen
Werkstoff: Stahl
Bemerkungen: Teil 2

Rauheitsprofil	Rauheitsparameter	Materialanteil
R- Profil ausgerichtet Filter ISO Taster T1E Lt = 4.80 mm 4.80	RSm 0.1291 mm Ra 0.30 µm RzISO 2.61 µm Rt 3.02 µm Pt 2.87 µm Wt 0.56 µm Rmr09(90.0 %) 1.38 µm	R-Profil Materialanteil 0.0 3.01 0% 20% 40% 60% 80% 100%
R- Profil ausgerichtet Filter ISO Taster T1E Lt = 4.80 mm 4.80	RSm 0.1465 mm Ra 0.31 µm RzISO 2.81 µm Rt 3.53 µm Pt 3.97 µm Wt 0.69 µm Rmr09(90.0 %) 1.94 µm	R-Profil Materialanteil 0.0 3.53 0% 20% 40% 60% 80% 100%
R- Profil ausgerichtet Filter ISO Taster T1E Lt = 4.80 mm 4.80	RSm 0.1371 mm Ra 0.30 µm RzISO 2.69 µm Rt 3.15 µm Pt 3.41 µm Wt 0.53 µm Rmr09(90.0 %) 1.85 µm	R-Profil Materialanteil 0.0 3.15 0% 20% 40% 60% 80% 100%

Messprotokoll

Fakultät Maschinenbau
FG Fertigungstechnik
Technikumplatz 17
09648 Mittweida



Hommeltester T1000 basic mit Tastspitze T1E KE2/90D

Firma: Hochschule Mittweida
Abteilung: Labor 3 (5-032B)

HOMMELWERKE
Turbo Datawin-NT V1.48

11.05.12
10:09

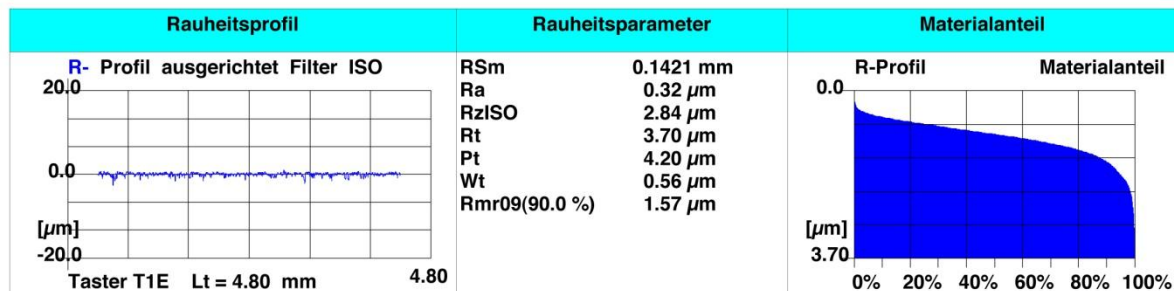
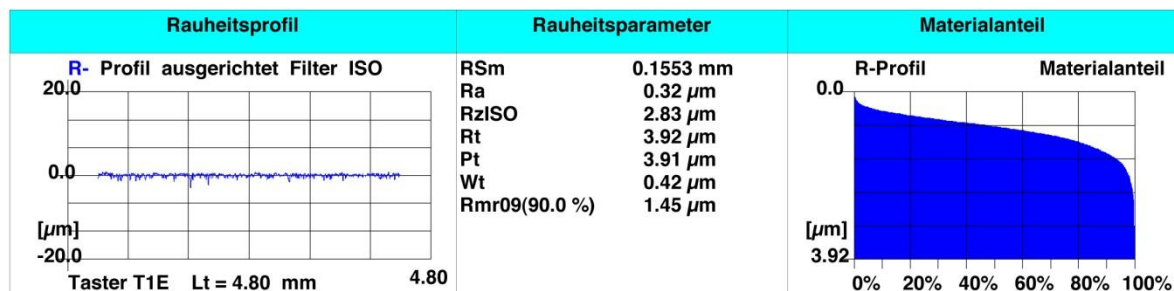
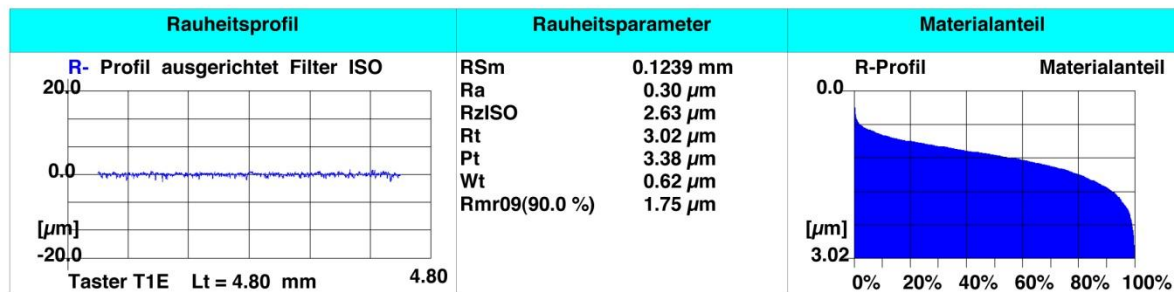
Meßbedingungen

Tastertyp : T1E
Meßbereich : 80 μm
Taststrecke : 4.80 mm
Lc (Cut Off) : 0.800 mm
Filter : ISO 11562(M1)

Verfahren: Schleifen

Werkstoff: Stahl

Bemerkungen: Teil 3



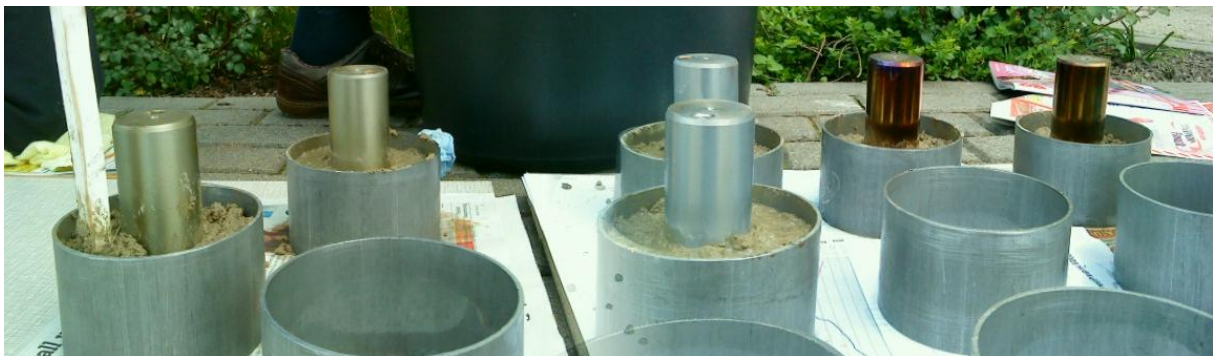
V. Bilder zur Versuchsvorbereitung



Verdichten der Ummantelung der Kunststoffbeschichtung



Auftrag des Trennmittels durch einen Pinsel



Ummantelung der Proben vor Versuch I



Reinigung der zweiten Probenhälfte

VI. Datenblatt des Nickelelektrolyten

DURNI-COAT®

Außenstromlos abscheidendes-Nickelbad auf Hypophosphit-Basis

Merkmale

DURNI-COAT ist ein stromlos arbeitendes Nickelbad zur Abscheidung metallisch glänzender Nickelschichten. Der Phosphorgehalt der Niederschläge liegt zwischen 7 - 9 %. In Verbindung mit dem DODUCHEM-Vorbehandlungsverfahren gewährleistet dieses Bad optimale Qualität bei hoher Wirtschaftlichkeit.

Ausrüstung

Behälter:

Aus Edelstahl mit anodischem Wannenschutz.

Heizung:

Direkt mit Heizelementen aus Edelstahl, indirekt durch Wärmemantel.

Filtration:

Kontinuierliche Filtration (10 - 14 mal Badvolumen/h) über Filterkerzen oder Filtersäcke (Filterfeinheit 3 - 5 µm).

Warenbewegung:

Wird empfohlen.

Absaugung:

Erforderlich

Lieferform und Badansatz

Badchemikalien für 100 l Badansatz:

DI-Wasser	67,80 l
DURNI-COAT Badansatzlösung	18,00 l
DURNI-COAT Regenerierlösung I	4,20 l
DURNI-COAT Stabilisator 10	10,00 l

- 1) Behälter zur Hälfte mit DI-Wasser befüllen.
- 2) Badkomponenten werden in obiger Reihenfolge unter Rühren zugegeben.
- 3) Auf Endvolumen auffüllen.
- 4) Einstellung des pH-Wertes und der Temperatur.

Arbeitsbedingungen

	Einheit	Soll	Bereich
Nickelgehalt	g / l	5	4,5 - 5,5
Hypophosphit	g / l	40	35 - 45
pH-Wert	pH	5,0	4,9 - 5,1
	Korrektur mit Ammoniak bzw. verdünnter Schwefelsäure.		
Badbelastung	dm ² /l	0,2 - 2,0 (aktive Cu-Oberfläche)	
Badtemperatur	°C	88	87 - 89
Abscheidegeschwindigkeit	15 - 20 µm / Stunde je nach pH-Wert, Temperatur und MTO		

Badüberwachung und Instandhaltung

Die Zusammensetzung des Nickelbades sollte auf den optimalen Werten gehalten werden. Die Ergänzung des Nickelbades erfolgt mit DURNI-COAT Regenerierlösungen I und II. Empfohlen wird eine kontinuierliche Dosierung der Ergänzerlösungen.

Für 1 g/l Nickel werden ergänzt:

DURNI-COAT Regenerierlösung I	8,3 ml/l
DURNI-COAT Regenerierlösung II	8,3 ml/l

Sicherheitsmaßnahmen und Entsorgung

DURNI-COAT Regenerierlösung I ist sauer.

DURNI-COAT Regenerierlösung II ist sauer und enthält das Reduktionsmittel und den Stabilisator.

DURNI-COAT Stabilisator 10 ist alkalisch.

Der Kontakt mit Haut und Augen ist zu vermeiden, es sind entsprechende Schutzmaßnahmen (Schutzbekleidung, Schutzbrille) beim Umgang mit der Badlösung bzw. den Konzentraten zu beachten.

Wir verweisen in diesem Zusammenhang auf das Sicherheitsdatenblatt und die UVV 14.0 der Berufsgenossenschaft (VBG 57). Die Entsorgung von verbrauchten Lösungen und Sparspüllösungen muß nach den behördlichen Abwasserbehandlungsvorschriften vorgenommen werden.

Diese Anleitung dient Ihrer Information.

Da die Verwendung der Präparate außerhalb unserer Kontrolle liegt, wird von AMI DODUCO keine Garantie hinsichtlich der Anwendung bzw. der zu erhaltenden Resultate übernommen. Wir garantieren jedoch für eine einwandfreie Qualität der Präparate zum Zeitpunkt der Lieferung.

Unser Kundendienst steht Ihnen bei eventuellen Schwierigkeiten für eine kostenlose Beratung zur Verfügung.

01/03 FK

RCO Galvanotechnik

Diese Gebrauchsanweisung ersetzt alle vorangegangenen Versionen.

Druck: 26.04.1999 Stand: 23.01.03

Vertrieb: Tel.: 07231-602-293

Fax: 07231-602-686

Technik: Tel.: 07231-602-379

VII. Bilder zum Oberflächenzustand der Schichten nach den Versuchen



Stark beschädigt DLC-Beschichtung mit Betonresten in der Probenmitte



Zerstörte Korrosionsschutzwachsbeschichtung



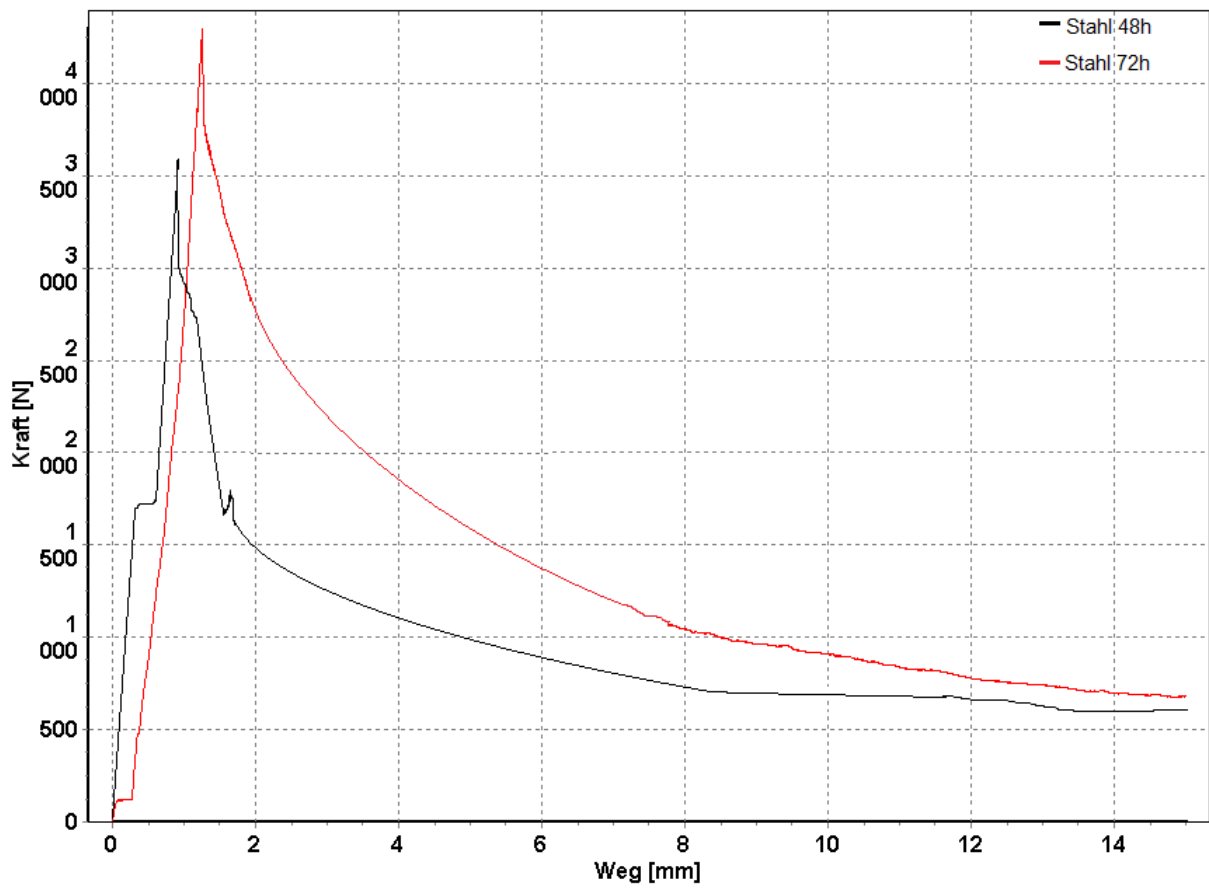
Unbeschädigte Nickel-PTFE-Schicht mit Betonanhaftungen in der Probenmitte



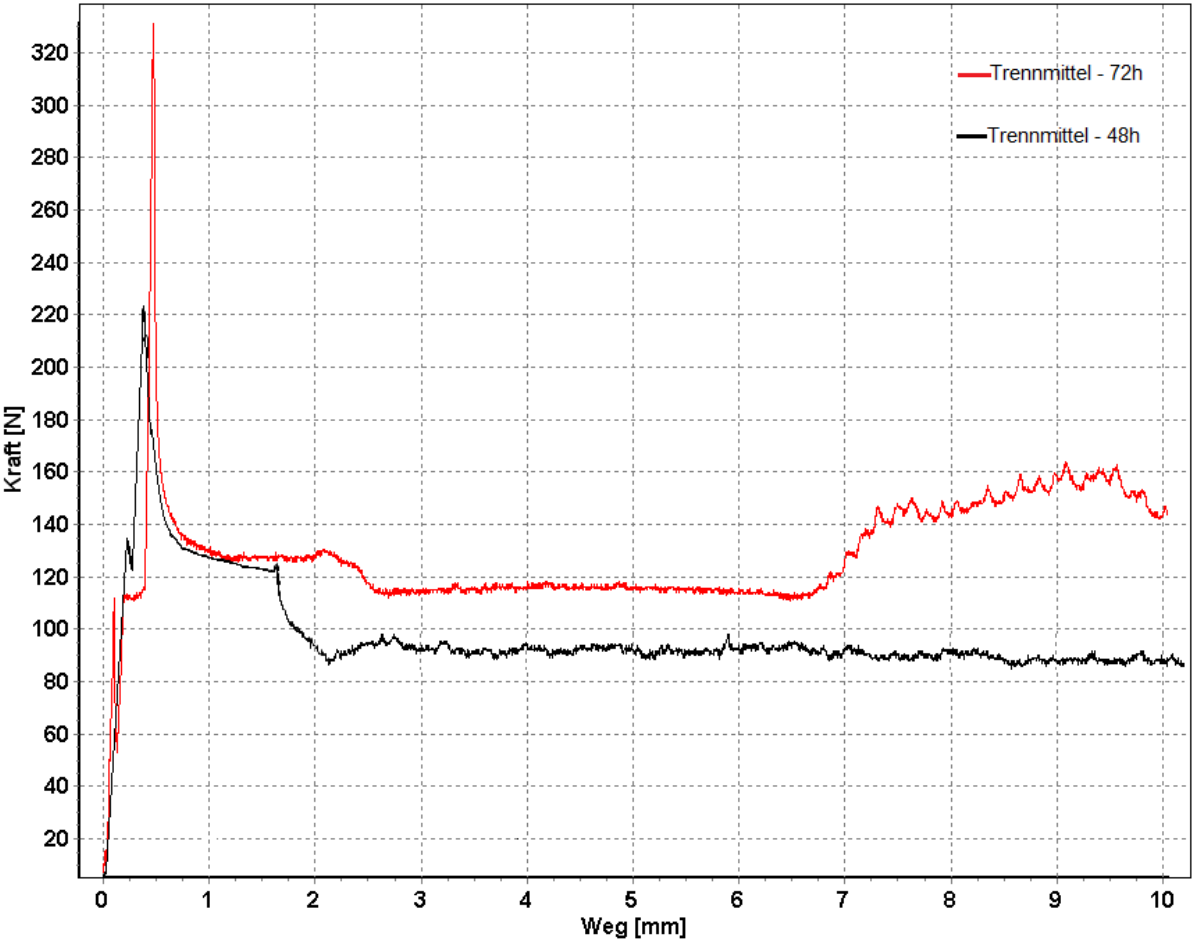
Abplatzungen an den Emailsichten

VIII. Kraft-Weg-Diagramme der Referenzwertbestimmung für 48/72 Stunden Aushärtungszeit

unbehandelte Stahlprobezylinder

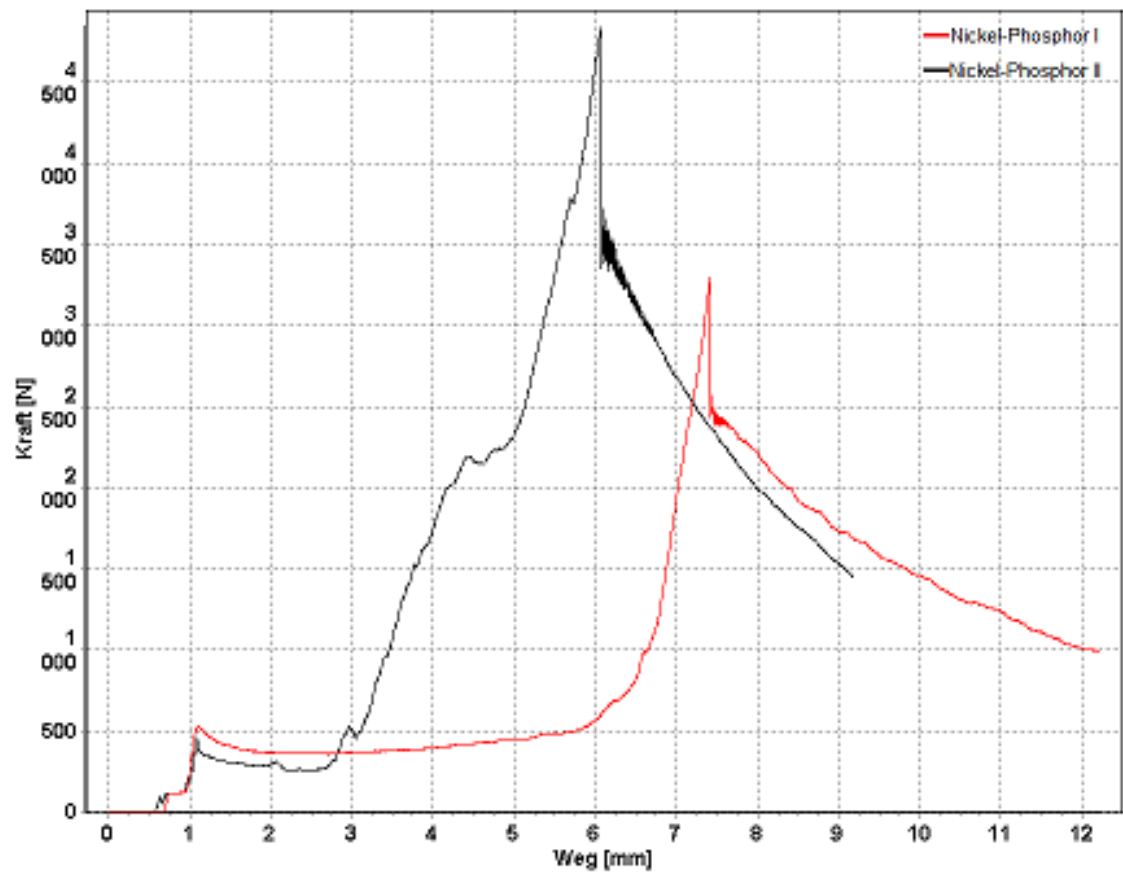


trennmittelbenetzte Probezylinder (Divinol)

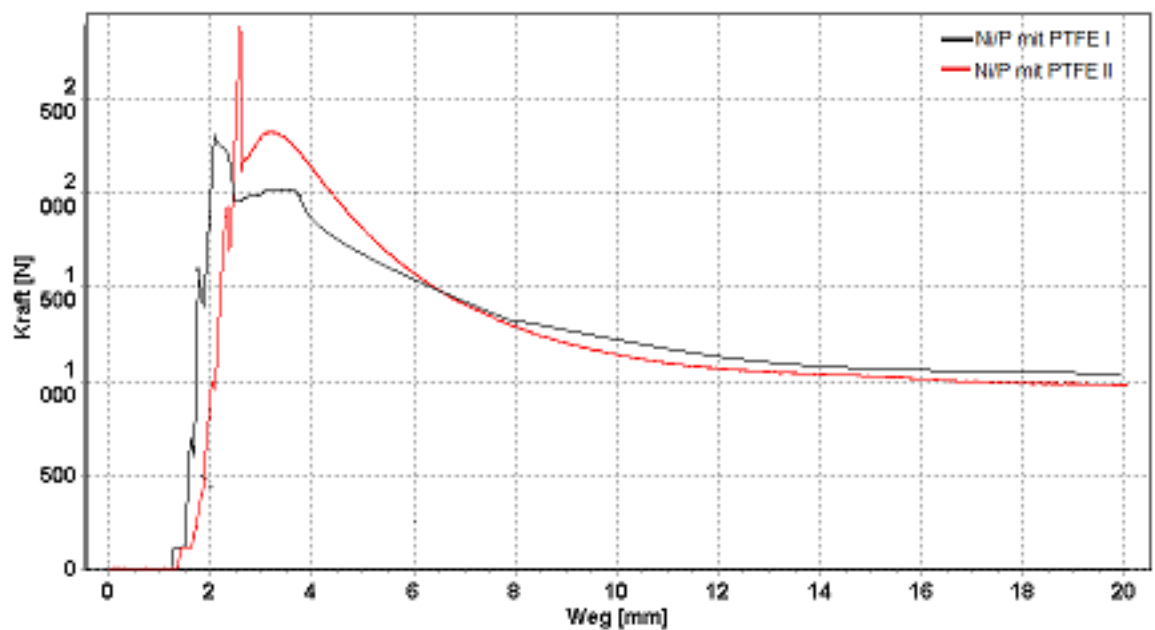


IX. Kraft-Weg-Diagramme zu Versuch I - 48 Stunden Aushärungszeit

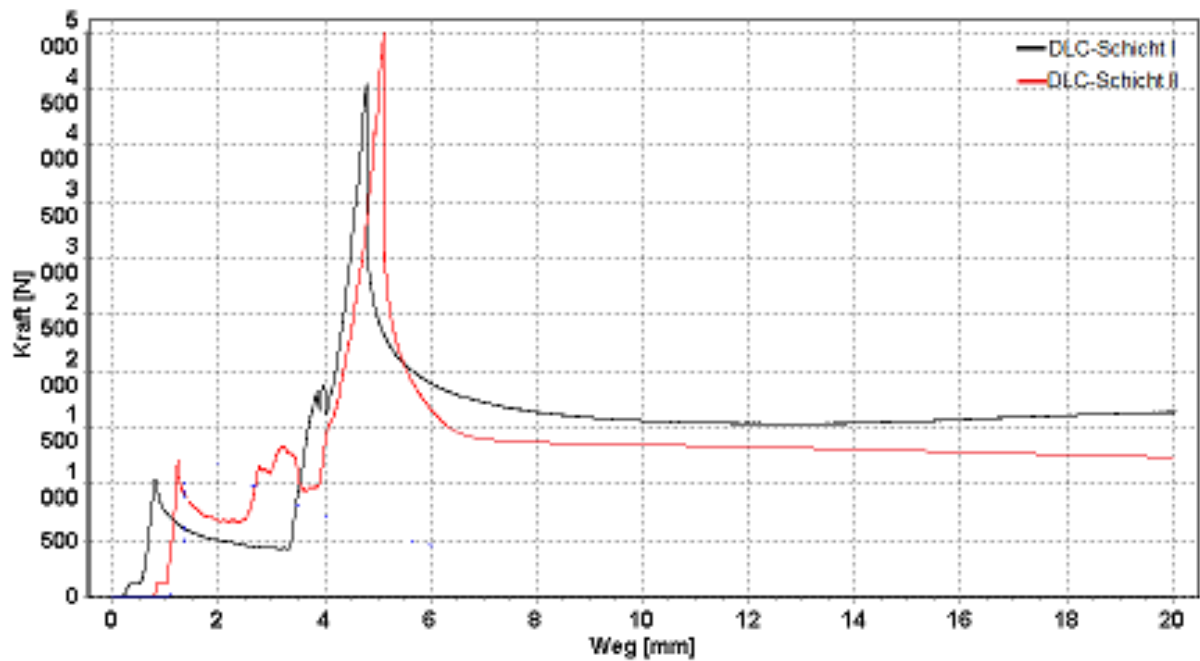
Nickel-Phosphor (getempert)



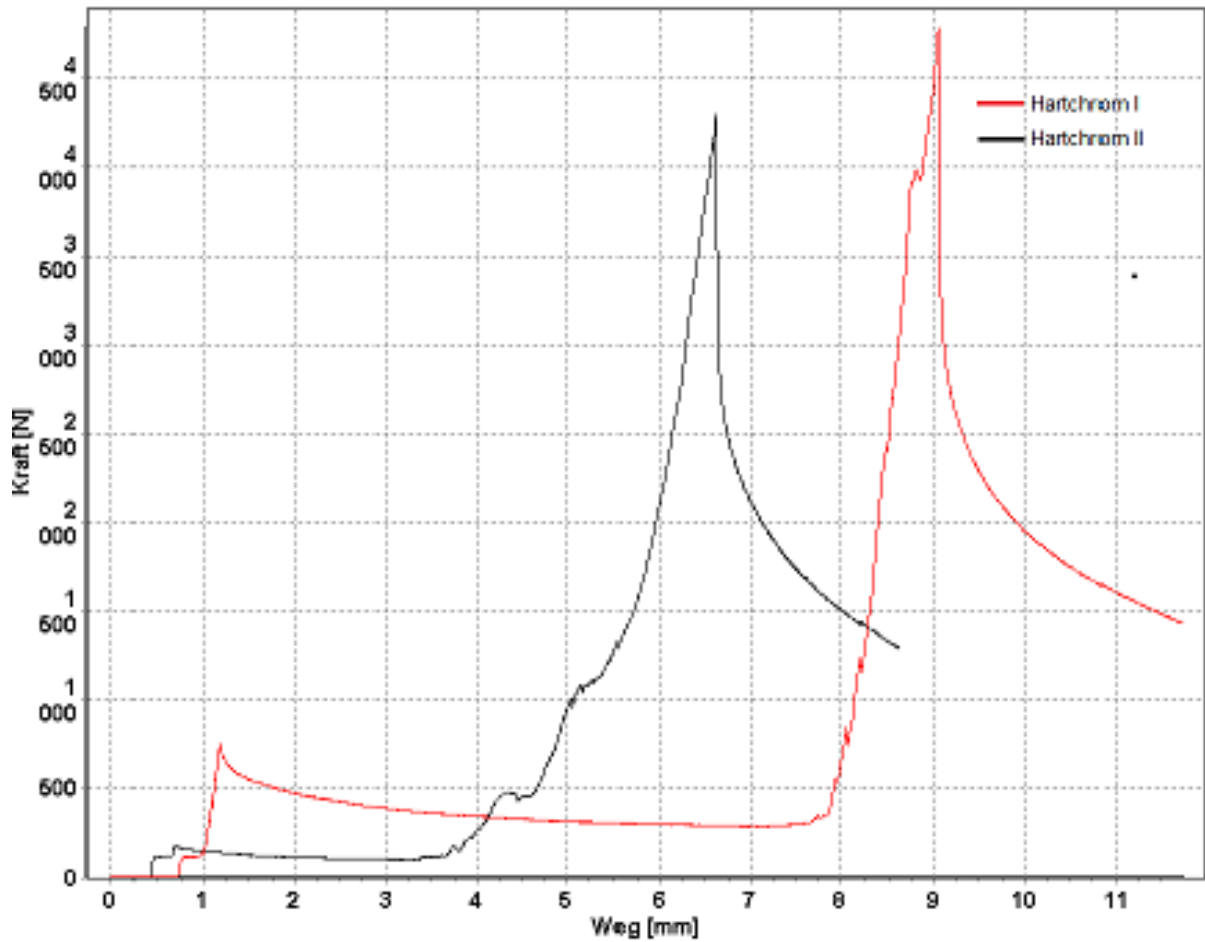
Nickeldispersion mit PTFE



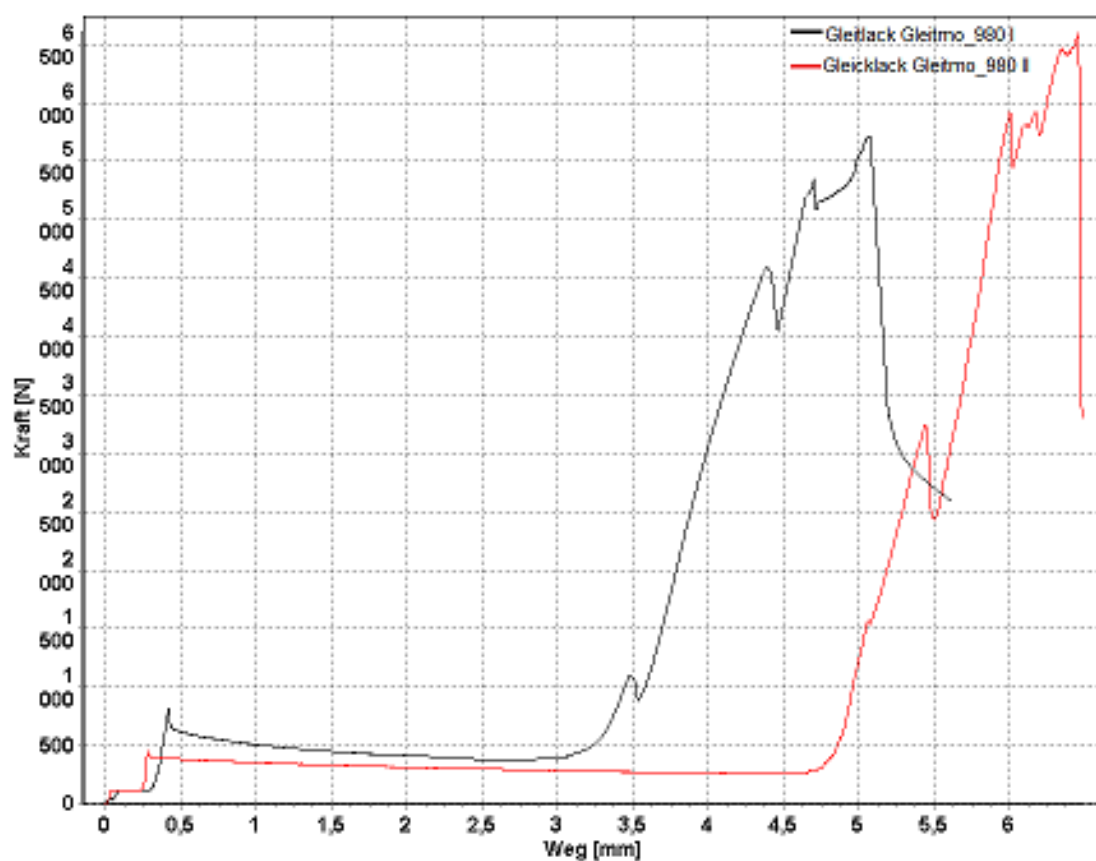
DLC (Diomond-like-Carbon)



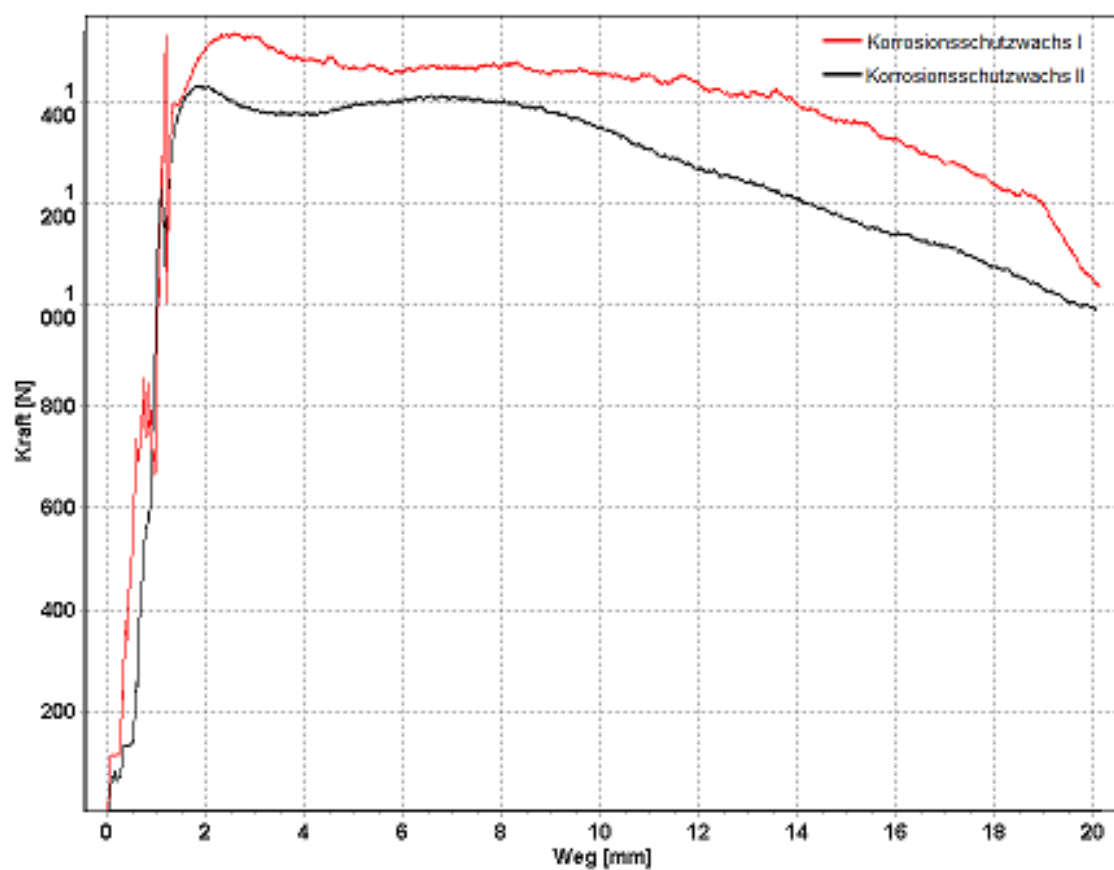
Hartchrom



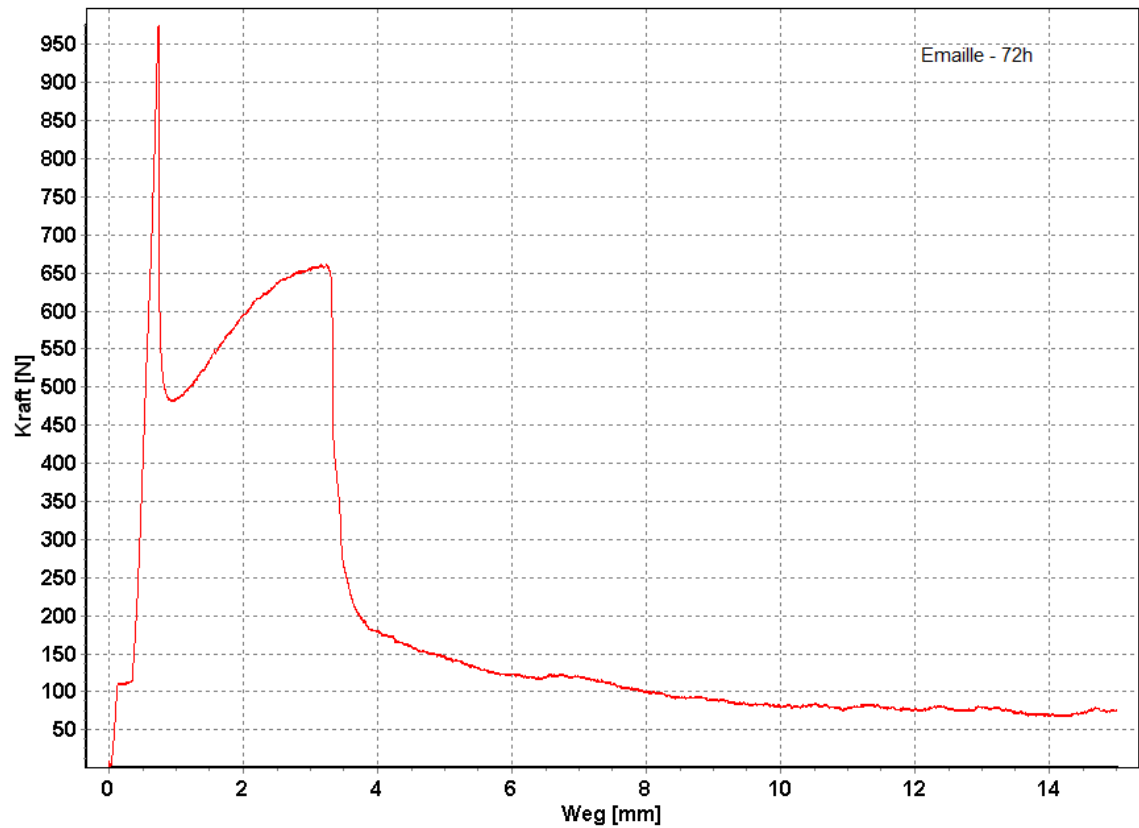
Gleitlack - Gleitmo_980



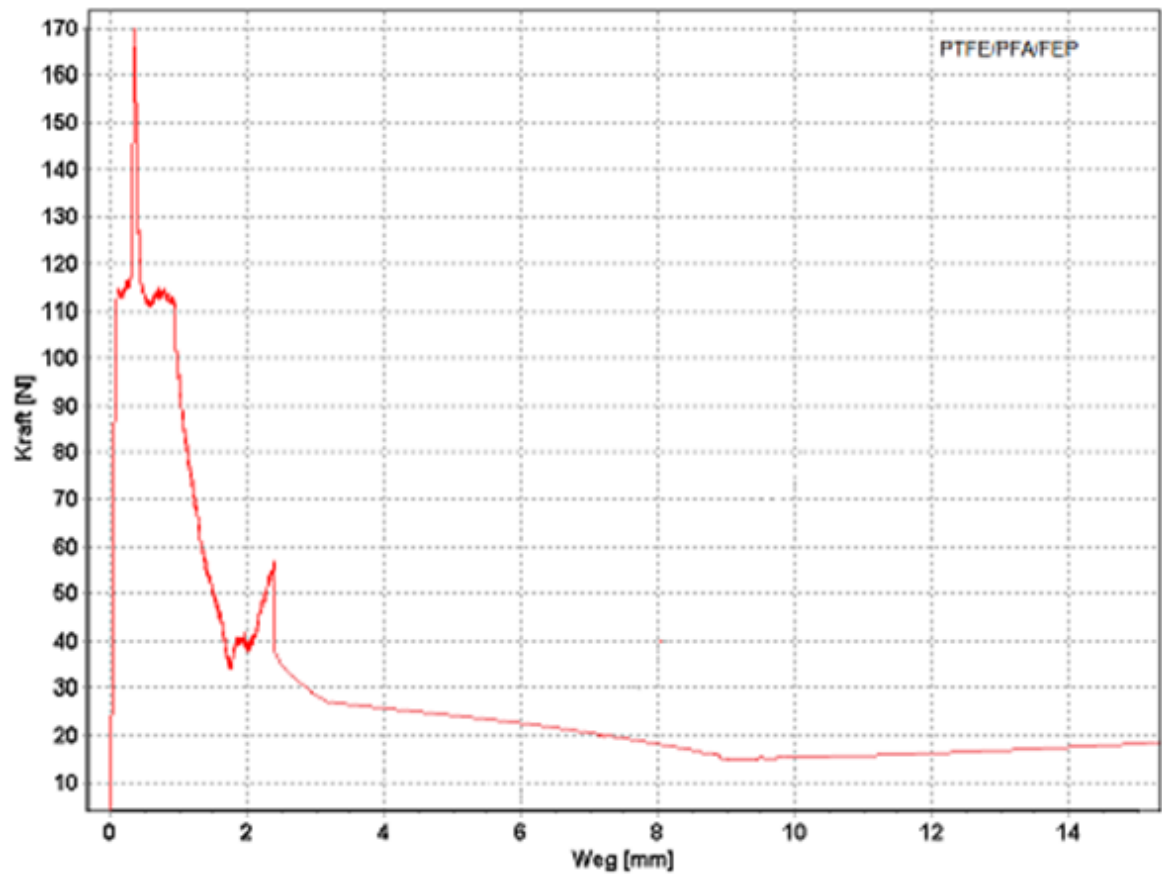
Korrosionsschutzwachs -Bechem_Multiprotect



Emaille



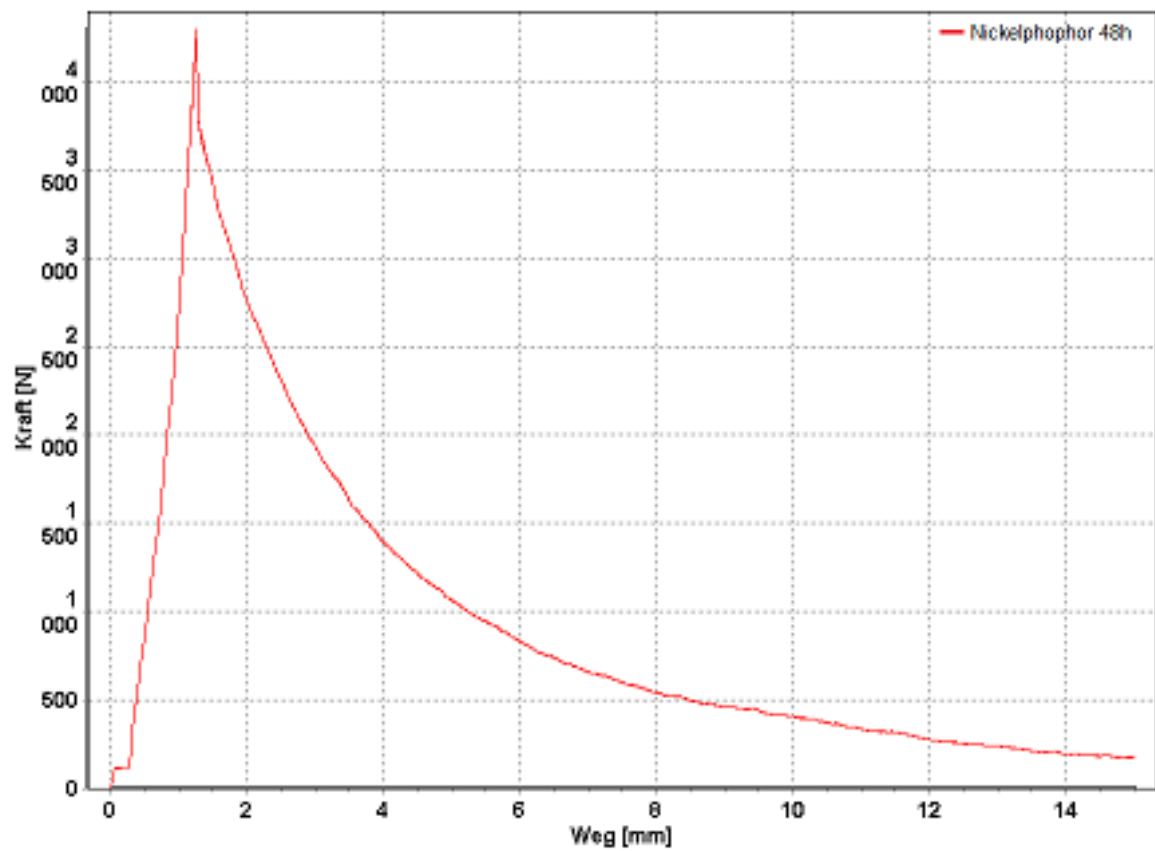
Kunststoff aus PTFE/PFA/FEP



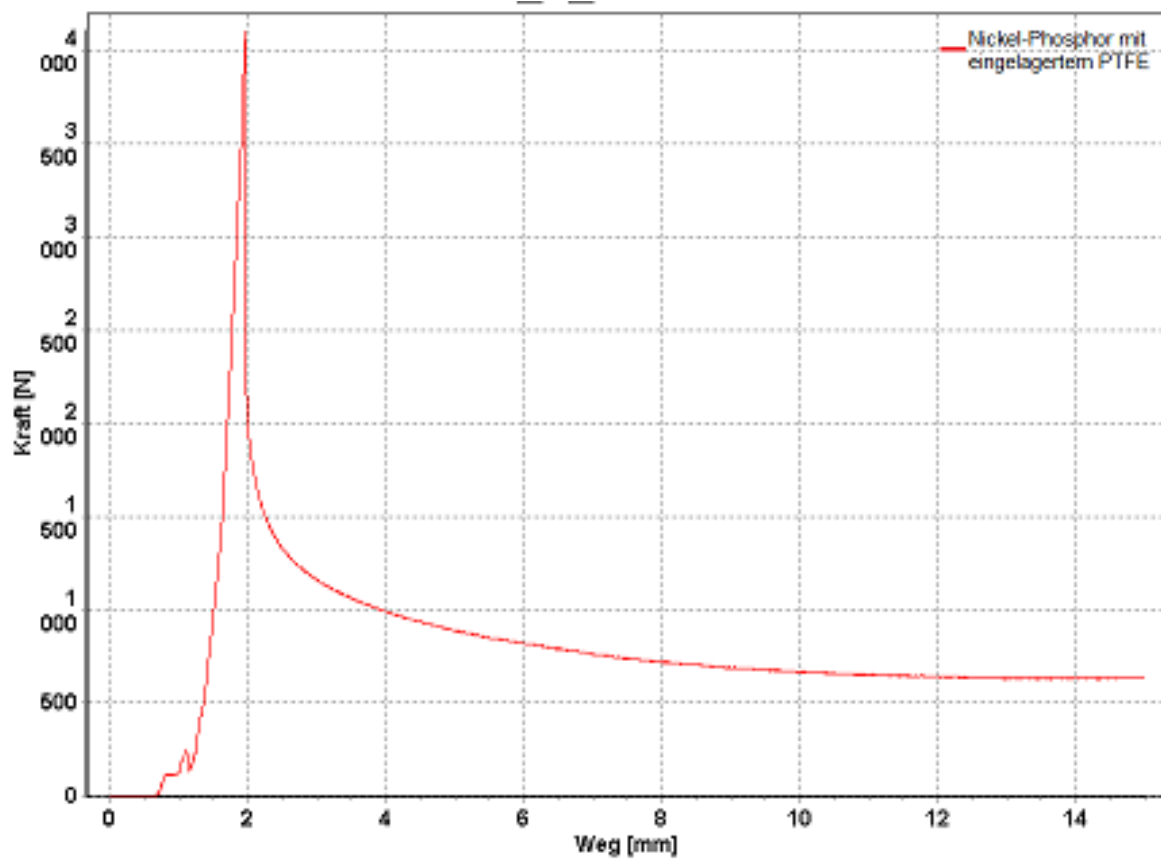
X. Kraft-Weg-Diagramme zu Versuch II - 72 Stunden

Aushärtungszeit

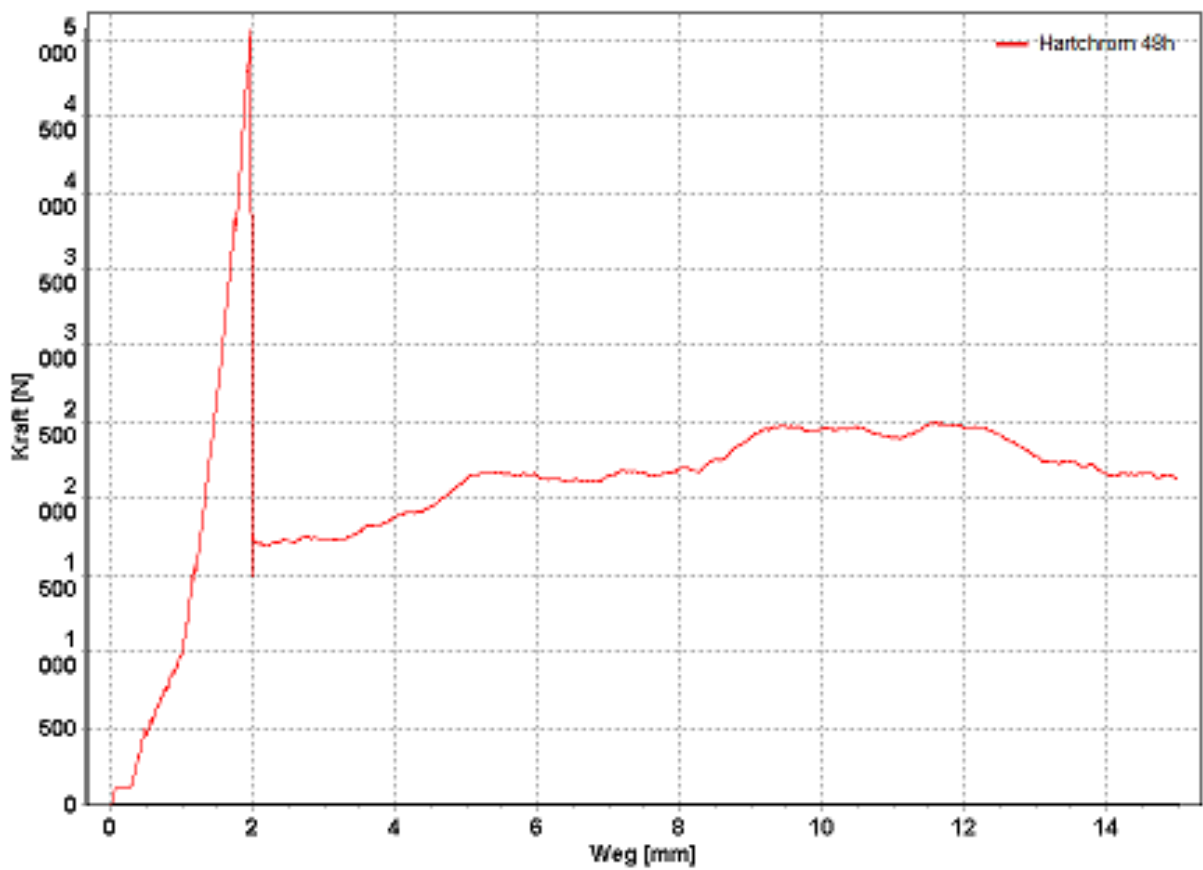
Nickel-Phosphor (getempert)



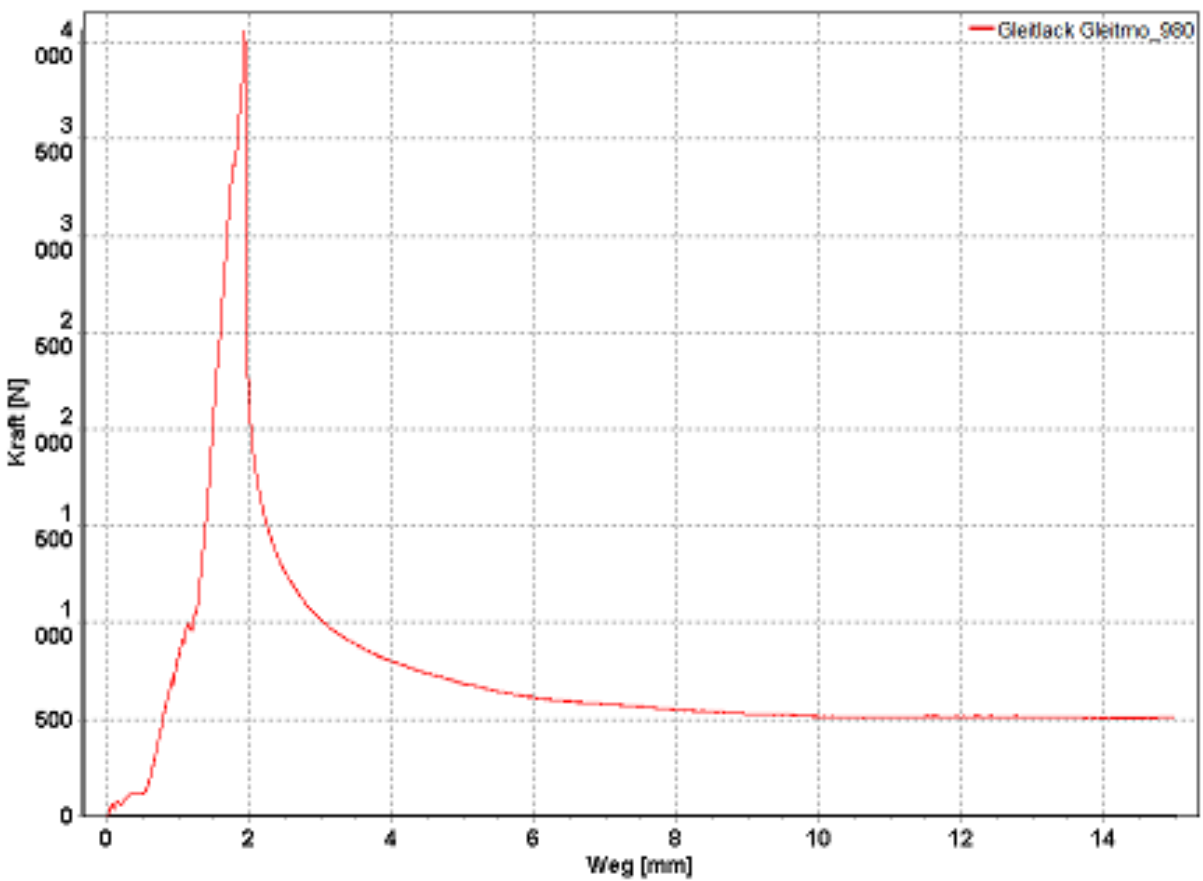
Nickeldispersion mit PTFE

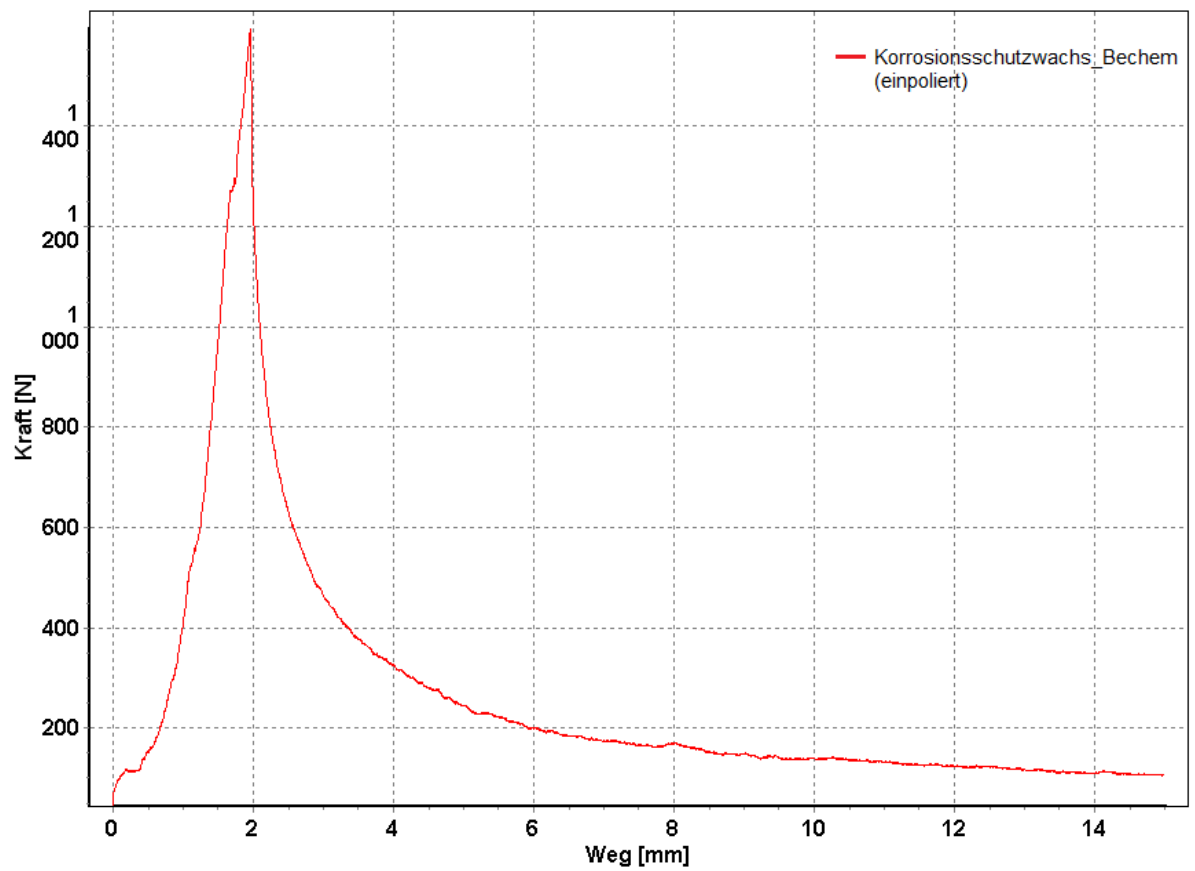
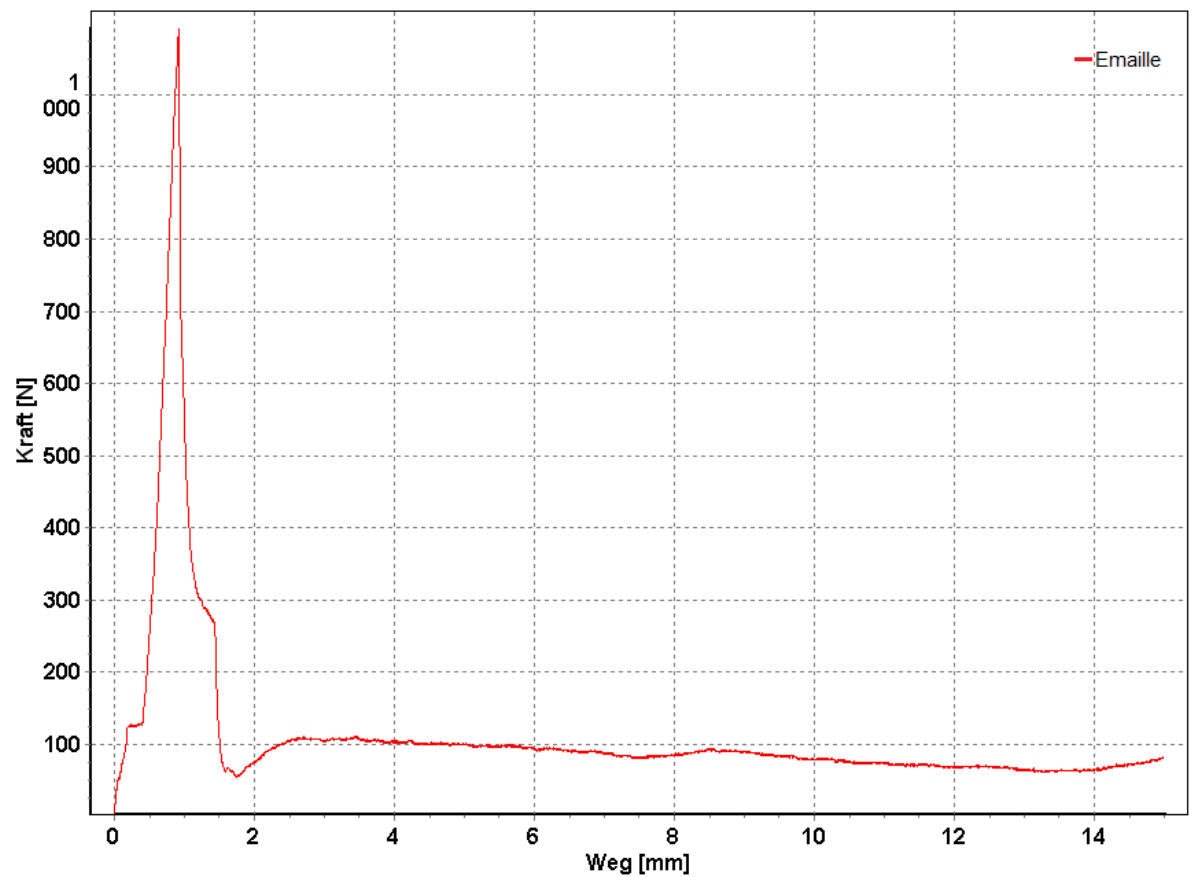


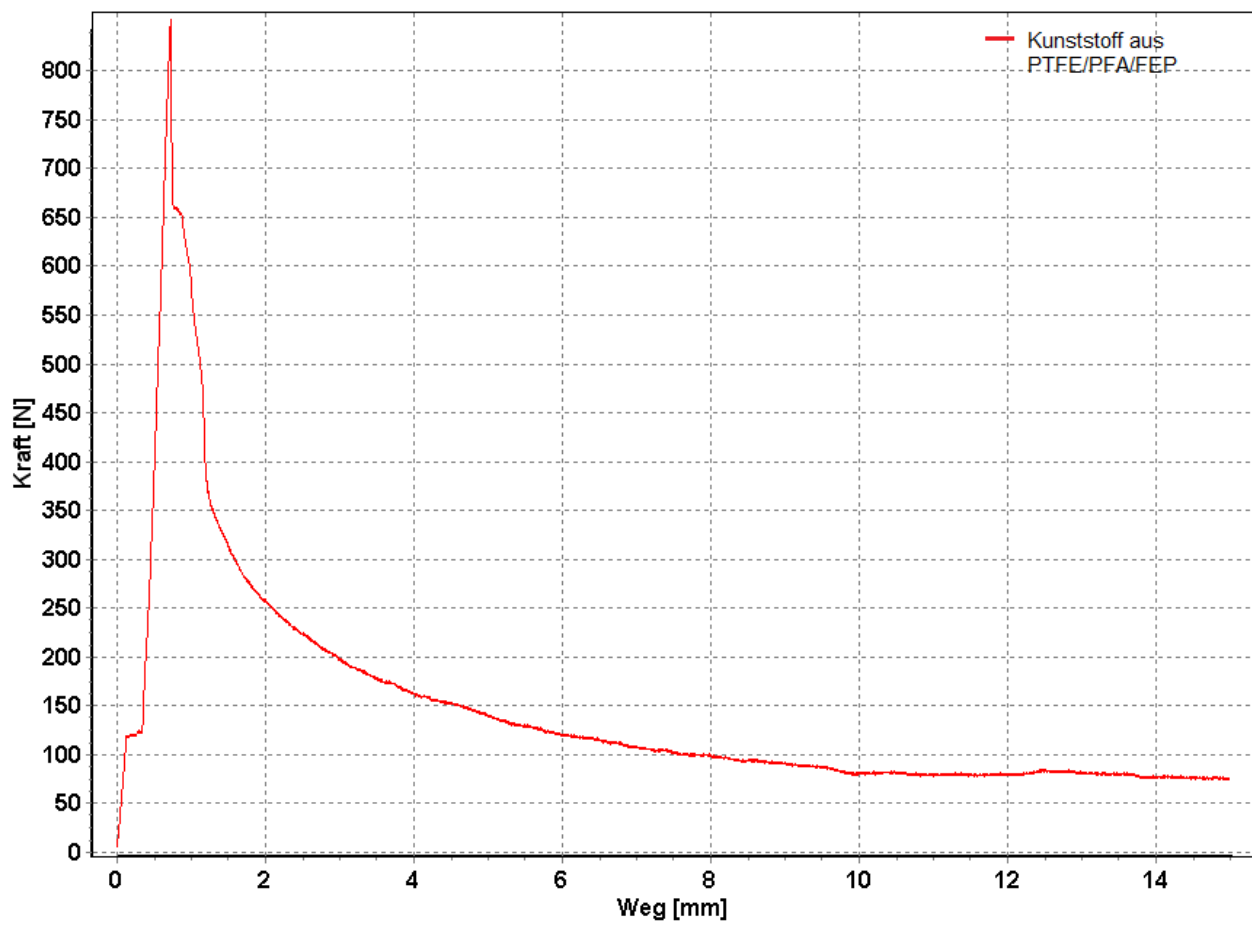
Hartchrom



Gleitlack - Gleitmo_980 (poliert)

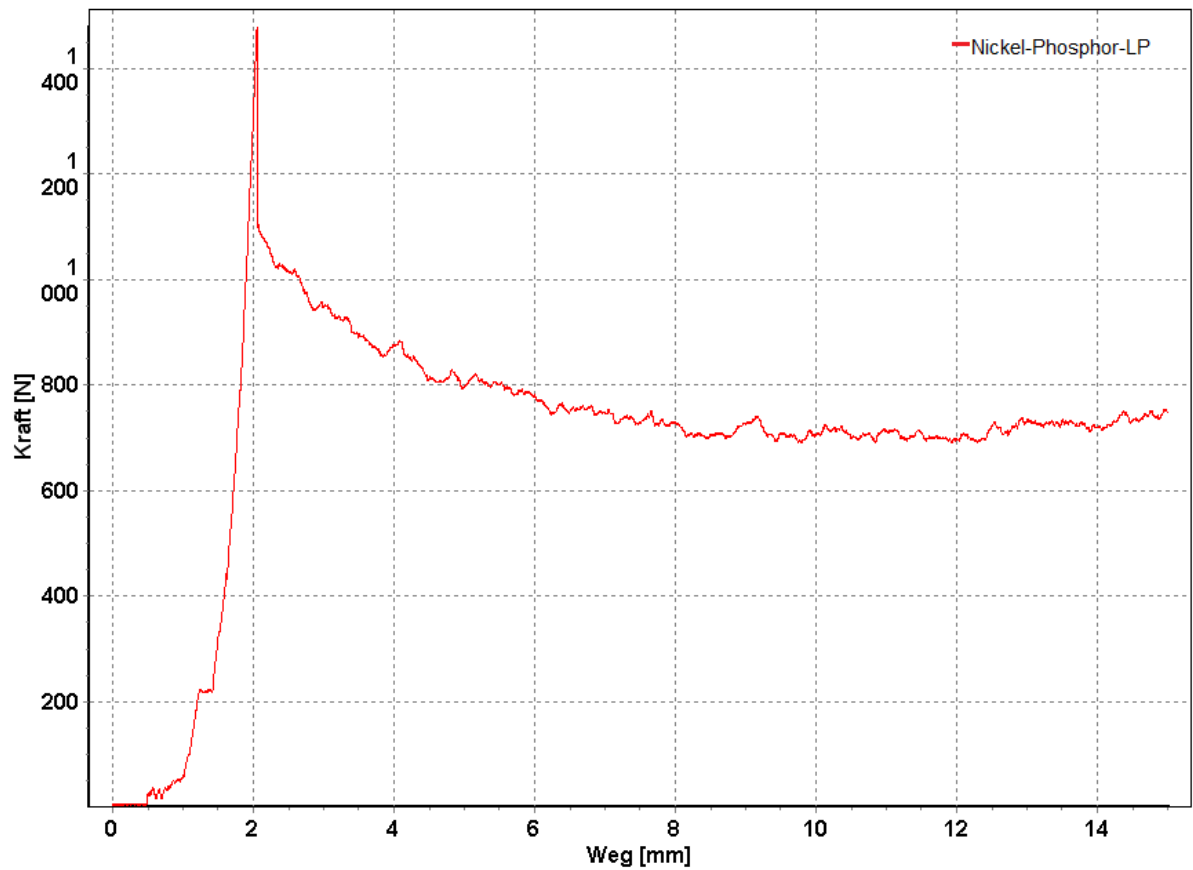


Korrosionsschutzwachs - Bechem_Multiprotect (einpoliert)**Emaile**

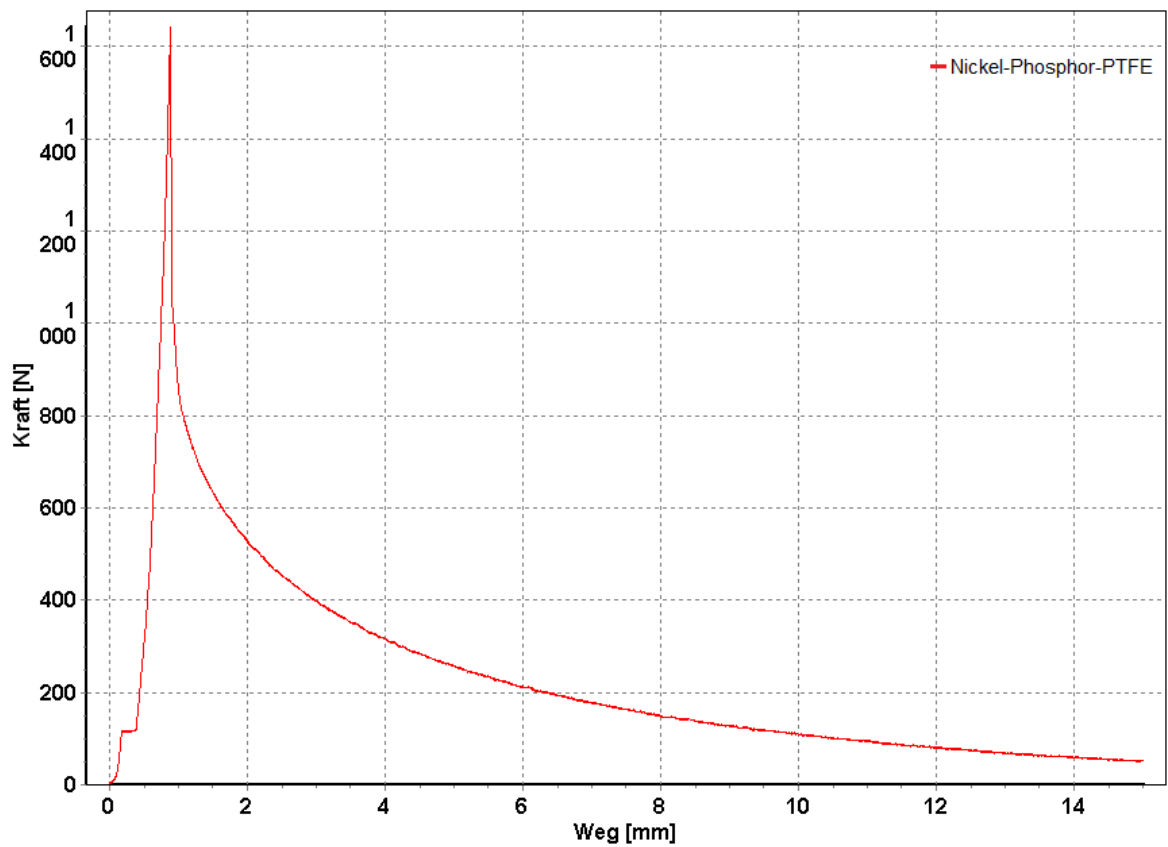
Kunststoff aus PTFE/PFA/FEP

XI. Kraft-Weg-Diagramme zu Versuch III - 48Stunden Aushärtungszeit - Betonzusatzmittel: Luftporenbildner

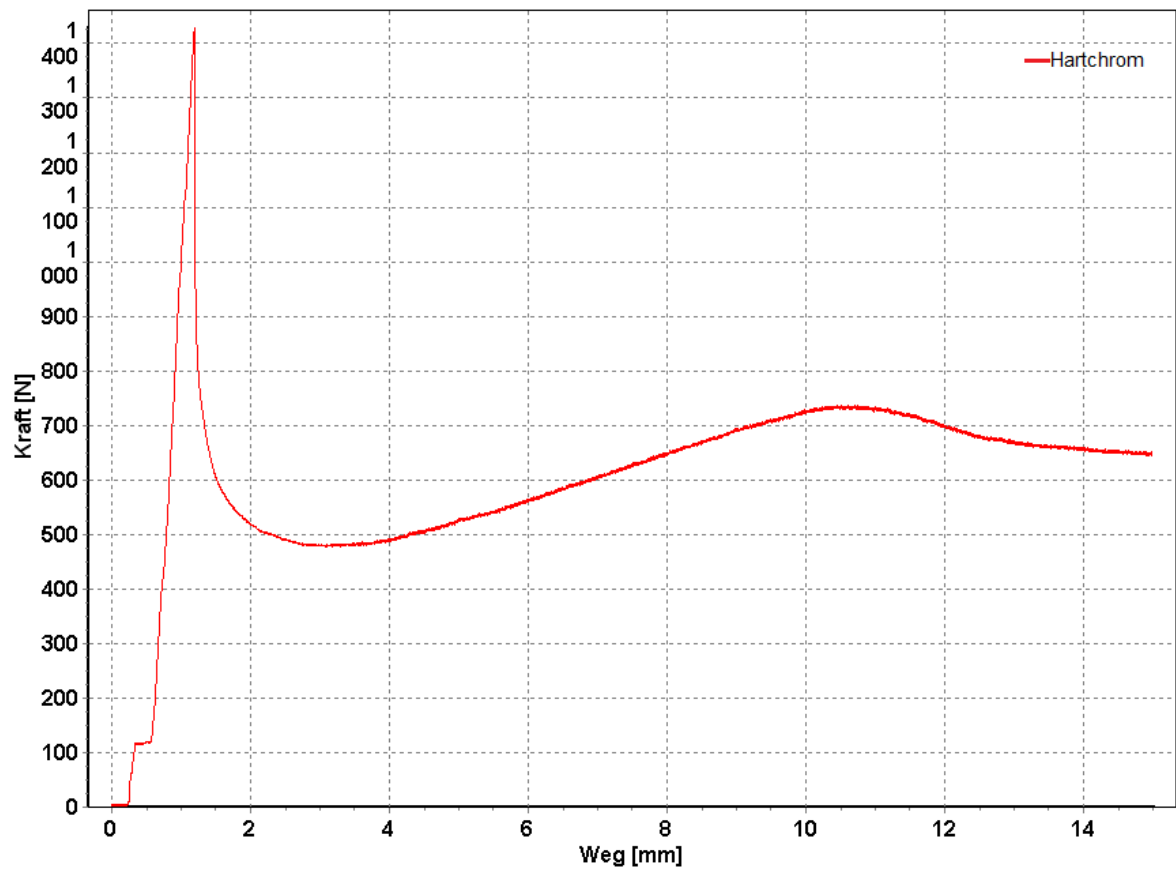
Nickel-Phosphor (getempert)

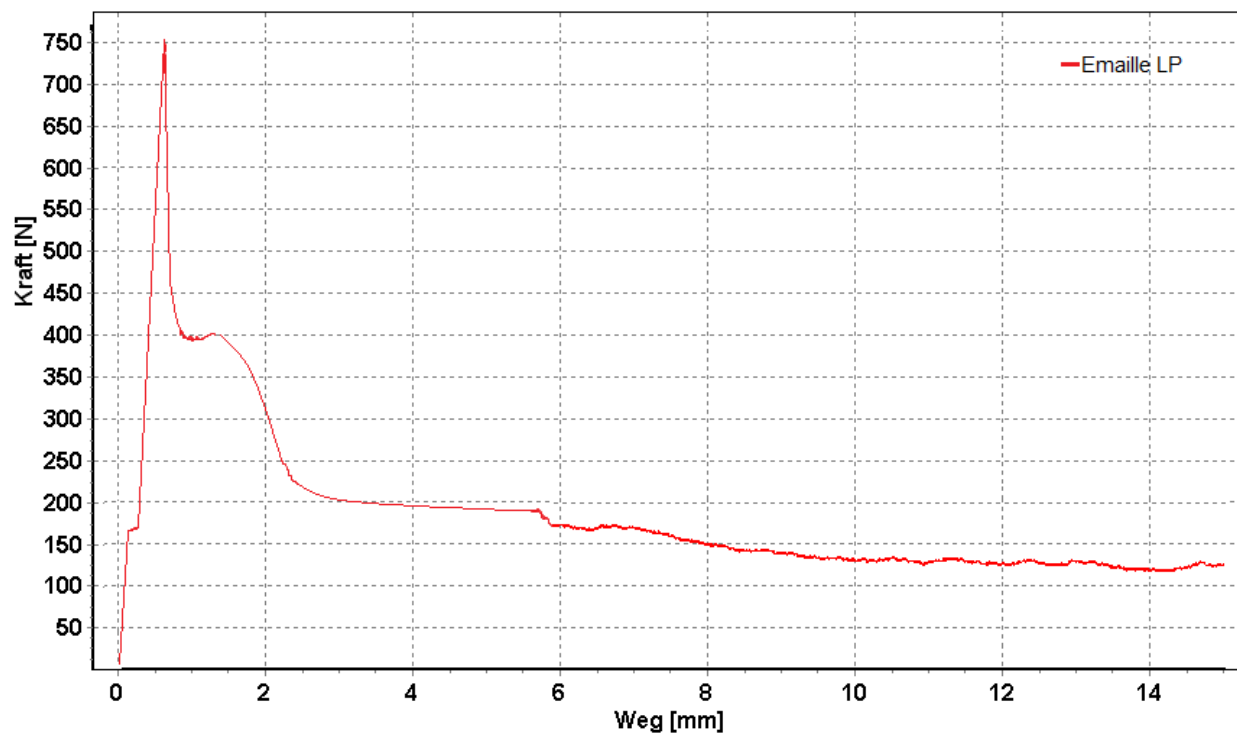
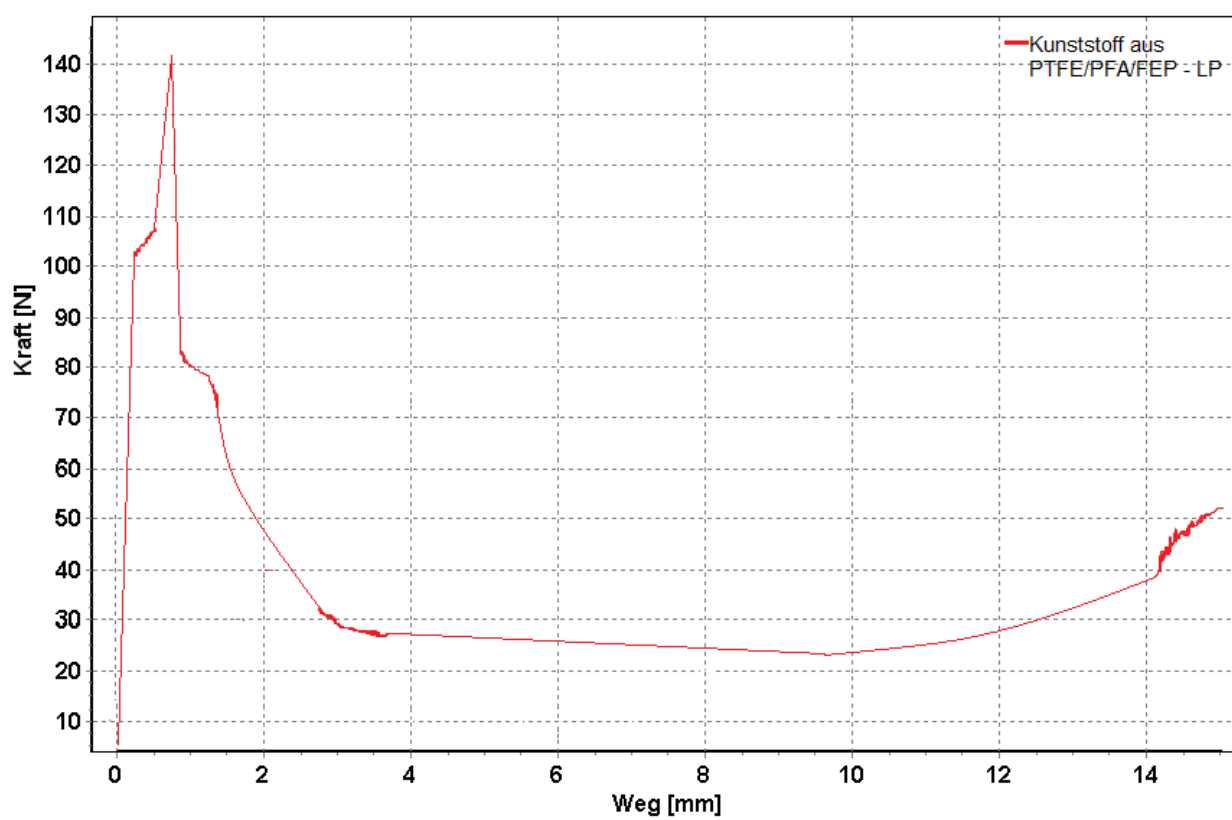


Nickeldispersion mit PTFE



Hartchrom



Emaile**Kunststoff aus PTFE/PFA/FEP**

XII. Preisangebot - Trennmittel

mark - Spezial- Bau- und Industriebedarf GmbH

83451 Piding, Ganghoferstraße 6+8 Tel. 08651/3478 Fax 08651/3367

USt-IdNr.: DE129262488

Steuer-Nr. 105/168/02508

www.schmierstoffe-mark.de

info@schmierstoffe-mark.de

Vertragshändler der
CARL BECHEM
GmbH
58089 Hagen



mark GmbH, Ganghoferstraße 8, 83451 Piding

BMTI Baumaschinentechnik

International GmbH

z.Hd. Herrn Näther

04435 Schkeuditz

Piding, 28.08.2012

Ihr Zeichen:

Ihre Nachricht vom:

Unser Zeichen:
Bitte stets angeben!
ML/mc

ANGEBOT

Sehr geehrter Herr Näther,

vielen Dank für Ihr Interesse an unseren **Spezialtrennmitteln**.

Bezugnehmend auf das Gespräch zwischen Ihnen und unserem Herrn Merk, bieten wir Ihnen unter Zugrundelegung unserer allg. Geschäftsbedingungen wunschgemäß gerne an:

Artikelbezeichnung	Gebindegröße	Preis per Einheit
MSBI AP 11-7/F	Fass á 199ltr / 155kg	€ 3,29/ltr.
MSBI AP 14-6/T	Fass á 205ltr / 170kg	€ 2,45/ltr.
MSBI MS/9	Fass á 194ltr / 170kg	€ 2,98/ltr.

Alle Preise verstehen sich zzgl. der z. Zt. gültigen MwSt, frei Haus ab 500,00€ Nettoauftragswert, darunter berechnen wir die entstandenen Kosten von Verpackung und Versand.

Datenblätter und Kurzbeschreibungen der Trennmittelbeschaffenheit und deren Vorteile ersehen Sie bitte aus den Anlagen und der E-Mail.

Preisbindung 30 Tage ab Angebotsdatum

Lieferzeit ca. 5 Arbeitstage nach Auftragseingang.

Wir hoffen Ihnen hiermit gedient zu haben und erwarten gerne Ihren Auftrag.

Mit freundlichen Grüßen,



Lydia Mark

Ihnen zu helfen ist unsere Aufgabe.

Partnerschaft ist unser Antrieb, außergewöhnlich unser Programm.

Fordern Sie uns, wir können Ihr Ergebnis optimieren.

Allen unseren Lieferungen liegen unsere Verkaufs-, Liefer- und Zahlungsbedingungen zugrunde.

HRB Nr. 3901, AG Traunstein – Geschäftsführerin Lydia Mark, Kauffrau

mark - Spezial- Bau- und Industriebedarf GmbH**83451 Piding, Ganghoferstraße 6+8** Tel. 08651/3478 Fax 08651/3367

USt-IdNr.: DE 129262488

HRB 3901, AG Traunstein, GF Lydia Mark

www.schmierstoffe-mark.deinfo@schmierstoffe-mark.de

Techn. Produktinformation

MSBI - MS/9

Betonanbackverhinderer

Produktbeschreibung:

MSBI - MS/9 ist wegen seines chemischen physikalischen Trenneffektes doppelt wirksam.

MSBI - MS/9 hinterlässt bei ordnungsgemäßer Anwendung keine Betonreste auf den Maschinen und Maschinenteilen.

MSBI - MS/9 verhindert das Verfestigen von Schmutz.

MSBI - MS/9 unterwandert nach häufigerer Anwendung alte Betonreste.

Einsatzbereich:

MSBI - MS/9 wird eingesetzt als Betonanbackverhinderer an Fahrmischern und Betonpumpen sowie zur Innenanwendung an Tunnelschälwagen.

MSBI - MS/9 wird pur eingesetzt, am wirtschaftlichsten durch den Einsatz von Sprühgeräten – 1 l auf 40 m².

MSBI - MS/9 kann auf die feuchte Oberfläche aufgebracht werden.

Technische Daten:

Farbe		hellgelb	
Dichte bei 15° C	g/cm ³	0.88	DIN 51 757/5
Viskosität bei 40° C	mm ² /s	7.8	DIN 51 562
Flammpunkt PM	°C	110	DIN ISO 1592
Pourpoint	°C	-18	DIN ISO 3016
Löslichkeit in Wasser		unlöslich	

Eigenschaften:

- sparsam im Verbrauch
- Einsatz bei Fahrmischern, Betonpumpen, Tunnelschälwagen
- Korrosionsschützend
- Wasserunterwandernd

Besondere Hinweise:

- Farb- und Lackbeständigkeitsprüfung ist empfehlenswert
- Restmengen dürfen nicht ins Abwasser oder Erdreich gelangen
- Nicht gemeinsam mit mineralöhlhaltigen Trennstoffen entsorgen

Angaben entsprechen dem derzeitigen Stand der Technik, Änderungen vorbehalten. Die Angaben bedeuten keine Eigenschaftszusicherung für den Einzelfall und entbinden den Verbraucher nicht von eigenen Prüfungen. Weitere Daten auf Anfrage.

Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 11.09.2012

Johannes Näther